



**Pedro Sacramento dos
Santos Gamelas**

**Vigas em aço inoxidável com secções em I de
Classe 4 ao fogo**



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil
Ano 2014

Pedro Sacramento dos Santos Gamelas **Vigas em aço inoxidável com secções em I de Classe 4 ao fogo**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro e co-orientação científica do Professor Doutor Paulo Jorge de Melo Matias Faria de Vila Real, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.

À memória da minha Avó

o júri

presidente

Prof. Doutora Ana Luísa Pinheiro Velosa
Professora Auxiliar da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Alexandre Gonçalves Piloto
Professor Coordenador do Instituto Politécnico de Bragança (arguente)

Prof. Doutor Nuno Filipe Ferreira Soares Borges Lopes
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro (orientador)

agradecimentos

Sendo este o final de mais uma fase da minha vida, como também a concretização de um objetivo pessoal, gostaria aqui de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que me ajudaram no desenvolvimento da presente dissertação.

Assim, começaria por agradecer ao meu orientador Prof. Nuno Lopes pela disponibilidade, partilha de conhecimentos, dedicação, paciência e pela sua excelente supervisão.

Ao meu coorientador Prof. Vila Real pela ajuda prestada e disponibilidade manifestada, bem como pelas importantes sugestões que transmitiu na realização de todo o trabalho.

Um agradecimento a todos os meus amigos pela paciência, constante apoio e companheirismo ao longo de todo o percurso académico e na realização do presente trabalho, em especial ao Pedro Ferreira, José Figueira, André Guimarães; Bruno Sousa e Tiago Carvalho.

Ao Carlos Couto pelo auxílio prestado na utilização do Ruby e à Cláudia Amaral pela disponibilidade e importantes sugestões fornecidas.

À minha namorada pela paciência e apoio incondicional que sempre demonstrou, bem como a força transmitida.

Por último, mas não menos importante, aos meus pais pela forma como me acompanharam e ajudaram para a conclusão deste meu percurso académico e aos meus irmãos, Tiago e Diogo, pelos valiosos conselhos e força transmitidos.

palavras-chave

Aço inoxidável, Secções de Classe 4, Vigas, Incêndio, Encurvadura lateral, Eurocódigo 3.

resumo

A presente dissertação tem como interesse aumentar o conhecimento do comportamento estrutural dos elementos de aço inoxidável na construção.

A aplicação de elementos estruturais em aço inoxidável com secções de Classe 4 tem aumentado. Apesar do preço inicial, o aço inoxidável possui, de facto, várias características desejáveis num material estrutural. Estes perfis de paredes finas são mais suscetíveis à ocorrência de encurvadura local. Além disso, em vigas a encurvadura lateral é também um modo de falha comum. Estes fenómenos de instabilidade intensificam-se quando os perfis são submetidos temperaturas elevadas, tais como as que ocorrem num incêndio.

Este trabalho tem como objetivo principal apresentar um estudo numérico, com o programa de elementos finitos SAFIR, sobre o comportamento ao fogo com perfis em I (vigas) de aço inoxidável de Classe 4, quando submetido à flexão a altas temperaturas.

São avaliados a influência de vários parâmetros como o tipo de aço, o tipo de carregamento e o tipo de secção transversal. E por fim são realizadas comparações entre os resultados numéricos e a metodologia utilizada pelo Eurocódigo 3 bem como entre outras propostas.

keywords

Stainless steel, Class 4 sections, Beams, Fire, Global buckling, Eurocode 3

abstract

The main focus of the present thesis is to increase the knowledge of the structural behavior of stainless steel elements in construction .

The use of structural elements in stainless steel with class 4 sections has increased. Even though the initial cost, stainless still has several desirable characteristics in a structural material. In thin walls, local buckling is more likely to happen in these profiles. Besides that, global buckling in beams is also a common failure mode. These phenomena of instability are intensified when the profiles are submitted to high temperatures, such as the ones that occur in a fire.

The main purpose of this work is to present a numerical study describing the behavior of class 4 profiles in stainless steel. I shape sections when submitted to bending at high temperatures. This study is made using the finite elements software SAFIR.

The influence in several parameters such as type of steel, type of load and type of cross section is evaluated. Finally, a comparison between numerical results and the methodology use in Eurocode 3, among other proposals, are made.

Índice

Índice	XV
Índice de Figuras	XVII
Índice de Tabelas	XXI
Nomenclatura.....	XXIII
Lista de Acrónimos.....	XXVII
1. Introdução.....	3
1.1. Considerações gerais.....	3
1.2. Âmbito e Objetivos	6
1.3. Estrutura da Dissertação	6
2. O aço inoxidável.....	11
2.1. Considerações gerais.....	11
2.2. Aplicações Estruturais	14
2.3. Comportamento mecânico do aço inoxidável a altas temperaturas	16
3. Cálculo Estrutural para vigas de aço inoxidável	23
3.1. Conceitos e Fundamentos Teóricos	23
3.1.1. Encurvadura Local	23
3.1.2. Encurvadura Lateral.....	25
3.2. Regras de cálculo existentes à temperatura ambiente	27
3.2.1. Classificação das secções.....	27
3.2.2. Resistência da secção.....	33
3.2.3. Resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral	34
3.3. Regras de cálculo existentes em situação de incêndio	35
3.3.1. Classificação das secções.....	35
3.3.2. Resistência da secção.....	36
3.3.3. Resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral	37
3.4. Outras propostas de cálculo em situação de incêndio	40

3.4.1. Anexo Nacional Francês do Eurocódigo 3 para Classe 4.....	40
3.4.2. Manual EuroInox para todas as Classes	40
3.4.3. Proposta para perfis I de Classes 1 e 2	41
3.4.4. Nova proposta para perfis I de Classe 4	43
4. Modelação Numérica	47
4.1. Considerações gerais	47
4.1.1. Descrição geral do programa SAFIR	47
4.1.2. Descrição geral do programa Cast3M + Ruby	48
4.2. Casos de Estudo	52
4.3. Propriedades da secção	53
4.4. Definição do modelo numérico	54
5. Estudo Paramétrico	59
5.1. Influência dos parâmetros	60
5.1.1. Influência do tipo de aço.....	60
5.1.2. Influência da secção transversal	63
5.1.3. Influência do tipo de carregamento	66
5.2. Avaliação estatística.....	70
6. Considerações finais.....	79
6.1. Conclusões gerais.....	79
6.2. Desenvolvimentos futuros.....	80
Referências bibliográficas	85
A. Restantes resultados obtidos	91

Índice de Figuras

Capítulo 1

Figura 1.1 - Comportamento de secções à flexão (Vila Real, 2003).....	4
Figura 1.2 - Encurvadura local de uma viga metálica com secção de Classe 4 (Imagem após estudo experimental a altas temperaturas) (Hricák et al, 2014)	4
Figura 2.1 – Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000).....	11
Figura 2.2 - Edifício residencial de aço inoxidável, Finlândia.....	14
Figura 2.3 - Sanomatalo Building, Finlândia	15
Figura 2.4 - Wauxhall Cross Bus station, Londres.....	15
Figura 2.5 - Thames Gateway Water Treatment Water Works, Londres.....	16
Figura 2.6 – Relação tensão-extensão do aço inoxidável a altas temperaturas (CEN, 2005b).....	17
Figura 2.7 – Comparação da relação tensão-extensão para o aço carbono S235 e aço inoxidável 1.4301 a 600°C (Lopes et al, 2012)	18
Figura 2.8 – Comparação do $k_{0,2p,\theta}$ entre as várias classes de aço inox e o aço carbono (CEN, 2005b).....	19
Figura 2.9 – Comparação do kE, θ entre o aço inox e o aço carbono (CEN, 2005b)	19
Figura 3.1 – Curva do modo de instabilidade de uma viga (Lopes & Vila Real, 2014)	23
Figura 3.2 – Encurvadura de placa comprimida axialmente (Vila Real, 2010)	24
Figura 3.3 – Conceito de largura efetiva (Simões da Silva, 2007).....	25
Figura 3.4 – Encurvadura lateral de vigas (Vila Real, 2003)	26
Figura 3.5 – Encurvadura lateral numa viga com secção I duplamente simétrica submetida a momento fletor constante (Simões, 2005).....	27
Figura 3.6 - Secção transversal de Classe 4 submetida a momento fletor.....	28
Figura 3.7 - Viga simplesmente apoiada sujeita à flexão simples (Vila Real, 2003).....	34
Figura 3.8 - Variação do valor $kE, \theta k_y, \theta$ das 5 classes do aço inoxidável com o aumento da temperatura (Lopes, 2009)	36
Figura 3.9 - Viga simplesmente apoiada sujeita à flexão simples a altas temperaturas (Vila Real, 2003)	37
Figura 3.10 - Variação do valor $k_{0,2p, \theta} kE, \theta$ das 5 classes do aço inoxidável com o aumento da temperatura.....	40
Figura 4.1 - Elemento finto de casca (Lopes, 2009).....	48

Figura 4.2 - Primeiro modo de encurvadura global da secção 516x5 255x8 com o vão de 5 metros	50
Figura 4.3 - Primeiro modo de encurvadura local da secção 516x5 255x8 com o vão de 5 metros	51
Figura 4.4 - Tensões residuais em I - perfis soldados (C - compressão, T - tração) (Gardner, 2004)	51
Figura 4.5 - Modelo numérico (zonas críticas).....	54
Figura 4.6 - Modelo numérico adotado (ao centro) com as condições de apoio (ampliado).....	55
Figura 4.7 - Instante da ocorrência da carga última	56
Figura 5.1 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301	62
Figura 5.2 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4003	62
Figura 5.3 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4462	63
Figura 5.4 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma e banzo de Classe 4)	64
Figura 5.5 - Resultados numéricos para vigas 336x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 3 e banzo de Classe 4).....	65
Figura 5.6 - Resultados numéricos para vigas 266x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 2 e banzo de Classe 4).....	65
Figura 5.7 - Resultados numéricos para vigas 366x5 150x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 3).....	66
Figura 5.8 - Resultados numéricos para vigas 416x5 135x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 2).....	66
Figura 5.9 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 ($\Psi=1$)	67
Figura 5.10 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 ($\Psi=0$)	69
Figura 5.11 - Instante da carga última para a viga 516x5 255x8 de aço inoxidável 1.4301 com 10 metros de vão a 350°C ($\Psi=0$)	69
Figura 5.12 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 ($\Psi=-1$).....	70

Figura 5.13 - Instante da carga última para a viga 516x5 255x8 de aço inoxidável 1.4301 com 14 metros de vão a 350°C 14 metros ($\Psi=-1$)	70
Figura 5.14 - Comparação estatística entre o Eurocódigo 3 e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis	72
Figura 5.15 - Comparação estatística entre o Eurocódigo 3 e os resultados numéricos para a classe 1.4301	72
Figura 5.16 - Comparação estatística entre o Anexo Nacional Francês e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis.....	73
Figura 5.17 - Comparação estatística entre o Anexo Nacional Francês e os resultados numéricos para a classe 1.4301	73
Figura 5.18 Comparação estatística entre a proposta do Manual EuroInox e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis	74
Figura 5.19 - Comparação estatística entre a proposta do Manual EuroInox e os resultados numéricos para a classe 1.4301	74
Figura 5.20 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis	75
Figura 5.21 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos para a classe 1.4301	75
Figura 5.22 - Comparação estatística entre a nova proposta e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis	76
Figura 5.23 - Comparação estatística entre a nova proposta e os resultados numéricos para a classe 1.4301	76
Figura A.1 - Resultados numéricos para vigas 416x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4).....	91
Figura A.2 - Resultados numéricos para vigas 416x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4).....	92
Figura A.3 - Resultados numéricos para vigas 336x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4).....	92
Figura A.4 - Resultados numéricos para vigas 366x5 150x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4).....	93
Figura A.5 - Resultados numéricos para vigas 266x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 3 e banzo de Classe 4).....	93
Figura A.6 - Resultados numéricos para vigas 416x5 135x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 3).....	94

Figura A.7 - Resultados numéricos para vigas 246x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 2 e banzo de Classe 4)	94
Figura A.8 - Resultados numéricos para vigas 416x5 120x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 2)	95
Figura A.9 - Resultados numéricos para vigas 416x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	95
Figura A.10 - Resultados numéricos para vigas 336x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	96
Figura A.11 - Resultados numéricos para vigas 366x5 150x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	96
Figura A.12 - Resultados numéricos para vigas 266x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	97
Figura A.13 - Resultados numéricos para vigas 416x5 135x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	97
Figura A.14 - Resultados numéricos para vigas 236x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 3 e banzo de Classe 4)	98
Figura A.15 - Resultados numéricos para vigas 366x5 100x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 3)	98
Figura A.16 - Resultados numéricos para vigas 186x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 2 e banzo de Classe 4)	99
Figura A.17 - Resultados numéricos para vigas 416x5 91x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 2)	99
Figura A.18 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	100
Figura A.19 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	100
Figura A.20 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	101
Figura A.21 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)	101

Índice de Tabelas

Capítulo 2

Tabela 2.1- Comparação das propriedades dos aços S235 e 1.4301 à temperatura ambiente	12
Tabela 2.2 - Tipos de aço inoxidável com as classes correspondentes (CEN, 2005c)...	13
Tabela 2.3 - Aplicação em função das necessidades de resistência à corrosão (CEN, 2005c)	13
Tabela 3.1 - Classificação das secções transversais em função do seu momento resistente e da sua capacidade de rotação (Vila Real, 2003)	29
Tabela 3.2 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (alma) (CEN, 2006a)	30
Tabela 3.3 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (banzos) (CEN, 2006a)	31
Tabela 3.4 - Elementos internos comprimidos (almas) (CEN, 2006b)	32
Tabela 3.5 - Elementos externos comprimidos (banzos) (CEN, 2006b)	33
Tabela 3.6 - Fatores para a determinação da extensão e da rigidez do aço inoxidável Classe 1.4301 a temperaturas elevadas (CEN, 2005b)	39
Tabela 3.7 - Valores para o fator corretivo (Vila Real et al, 2008)}	42
Tabela 4.1 - Casos de estudo para $\Psi = 1$	52
Tabela 4.2 - Casos de estudo para $\Psi = 0$	53
Tabela 4.3 - Casos de estudo para $\Psi = -1$	53
Tabela 5.1 - Diagramas do momento fletor com o respetivo Ψ	67
Tabela 5.2 - Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos.....	71
Tabela 5.3 - Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos (aço 1.4301).....	71

Nomenclatura

Letras maiúsculas latinas

C_1	Coeficiente que dependem do tipo de carregamento
E	Módulo de elasticidade longitudinal do aço
E_a	Módulo de elasticidade longitudinal do aço à temperatura normal
$E_{a,\theta}$	Inclinação da reta que representa o domínio elástico para o aço a temperaturas elevadas θ_a
G	Módulo de distorção
$I_{eff,y}$	Momentos de inércia efetivo em relação ao eixo y-y
I_z	Momentos de inércia em relação ao eixo z-z
I_t	Momento de inércia de torção
I_w	Constante de empenamento
L	Comprimento do elemento
M	Valor de momento atuante
$M_{b,fi,t,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral, em situação de incêndio, no instante t
$M_{b,Rd}$	Valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral
M_{cr}	Momento crítico para encurvadura lateral
$M_{cr,\theta}$	Momento crítico para encurvadura lateral em situação de incêndio
$M_{c,Rd}$	Momento fletor resistente da secção
M_{Ed}	Valor de cálculo do momento fletor atuante
M_{Rd}	Valor de cálculo do momento fletor resistente
M_{el}	Valor de cálculo do momento fletor elástico
M_{pl}	Valor de cálculo do momento fletor plástico
$M_{fi,d}$	Valor de cálculo do momento fletor atuante em situação de incêndio
$M_{fi,t,Rd}$	Valor de cálculo do momento fletor resistente em situação de incêndio
$W_{eff,y}$	Módulo de flexão da secção transversal efetiva segundo y-y
$W_{pl,y}$	Módulo de flexão plástico segundo o eixo y-y
T	Valor de cálculo do momento torsor

Letras minúsculas latinas

b	Largura da secção transversal
b_{eff}	Largura efetiva do elemento comprimido
\bar{b}	Largura livre do elemento
f	Fator que tem em conta a distribuição de momentos
$f_{0,2p,\theta}$	Tensão limite convencional de proporcionalidade, referida à tensão de cedência a 20°C
f_u	Tensão última do aço
f_y	Tensão de cedência do aço a 20 °C
$f_{y,\theta}$	Tensão de cedência efetiva do aço a temperaturas elevadas θ_a
h	Altura da secção transversal
h_w	Altura da secção transversal definida no SAFIR
$k_{0,2p,\theta}$	Fator de redução para o valor de cálculo da tensão de cedência de secções de Classe 4
k_c	Fator de correção que depende da distribuição de momentos
$k_{y,\theta}$	Fator de redução da tensão de cedência do aço à temperatura atingida no instante t
$k_{E,\theta}$	Fator de redução para a inclinação da reta que representa o domínio elástico à temperatura do aço θ_a atingida no instante t
k_σ	Coeficiente de encurvadura local
v_i, v_s	Distância no eixo y-y entre os banzos inferiores e o centro de gravidade da secção

Caracteres do alfabeto grego

α	Fator de imperfeição;
α_{LT}	Fator de imperfeição para a encurvadura lateral
$\chi_{LT,mod}$	Fator de redução para a encurvadura lateral
$\chi_{LT,fi}$	Fator de redução para a encurvadura lateral, em situação de incêndio
Δ	Valor da amplitude definida no Ruby
ε_θ	Extensão a altas temperaturas
ε	Extensão
Φ_{LT}	Coeficiente utilizado para o cálculo do fator de redução da encurvadura

	lateral
$\Phi_{LT,\theta}$	Coeficiente utilizado para o cálculo do fator de redução da encurvadura lateral, em situação de incêndio
Φ_{pl}	Rotação (curvatura) da secção requerida para gerar uma distribuição de tensões plásticas total
Φ	Rotação (curvatura) da secção requerida
γ_{M1}	Coeficiente parcial de segurança de resistência de elementos sujeitos à encurvadura
$\gamma_{M1,fi}$	Coeficiente parcial de segurança de resistência de elementos sujeitos à encurvadura em situação de incêndio
γ_{M0}	Coeficiente parcial de segurança de resistência
$\bar{\lambda}_{LT}$	Esbelteza normalizada para encurvadura lateral
$\bar{\lambda}_{LT,\theta}$	Esbelteza normalizada para encurvadura lateral em situação de incêndio
$\bar{\lambda}_p$	Esbelteza adimensional normalizada local
ν	Coeficiente de Poisson
θ_a	Temperatura do aço
ρ	Fator de redução da largura efetiva
ψ	Quociente entre os momentos nas extremidades

Lista de Acrónimos

CEN	Comité Europeu de Normalização
CUFSM	Cornell University Finite Strip Method
EC3	Eurocódigo 3
EN	Norma Europeia
EN 1993-1-1	Parte 1-1 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-2	Parte 1-2 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-4	Parte 1-4 do Eurocódigo 3
EN 1993-1-5	Parte 1-5 do Eurocódigo 3
MEF	Método dos Elementos Finitos
SAFIR	Safety Fire Resistance

Capítulo 1

Introdução

1 Introdução

1.1 Considerações gerais

1.2 Âmbito e Objectivos

1.3 Estrutura da Dissertação

1. Introdução

1.1. Considerações gerais

O aço inoxidável possui um número elevado de características desejáveis na sua utilização como material estrutural (Euro Inox, 2006). É necessário um investimento inicial mais elevado dos aços inoxidáveis quando comparado aos aços de carbono, contudo podem ser mais competitivos uma vez que precisam de menos material para a proteção ao fogo e possuem um baixo custo de ciclo de vida, contribuindo desta forma para uma construção mais sustentável.

A principal vantagem do aço inoxidável é a resistência à corrosão, que leva com que seja um dos materiais com mais durabilidade na construção, sendo ao mesmo tempo um material excelente esteticamente e com fácil manutenção (Estrada et al, 2007).

Existem diferentes classes de aço inoxidável que de acordo com a sua estrutura metalúrgica são classificadas em 5 grupos: martensíticos, ferríticos (1.4003), austeníticos (1.4301), austeníticos-ferríticos ou duplex (1.4462) e os endurecidos por precipitação (Euro Inox, 2006). Os austeníticos e os duplex são habitualmente os mais usados em aplicações estruturais.

Em relação à classificação das secções transversais dos elementos estruturais, estas traduzem a forma como a resistência e a capacidade de rotação de uma secção são influenciadas por fenómenos de encurvadura local (Simões, 2005). Numa secção "não esbelta" a zona comprimida pode plastificar completamente enquanto numa secção esbelta poderá não plastificar devido a ocorrência prévia de fenómenos de encurvadura local.

Na presente dissertação irão apenas ser tratadas secções transversais de Classe 4, sendo *“aquelas onde ocorre a encurvadura local antes de atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção transversal”*(CEN, 2005a). Na Figura 1.1 é ilustrado o comportamento à flexão de todas as classes de secções existentes no Eurocódigo 3.

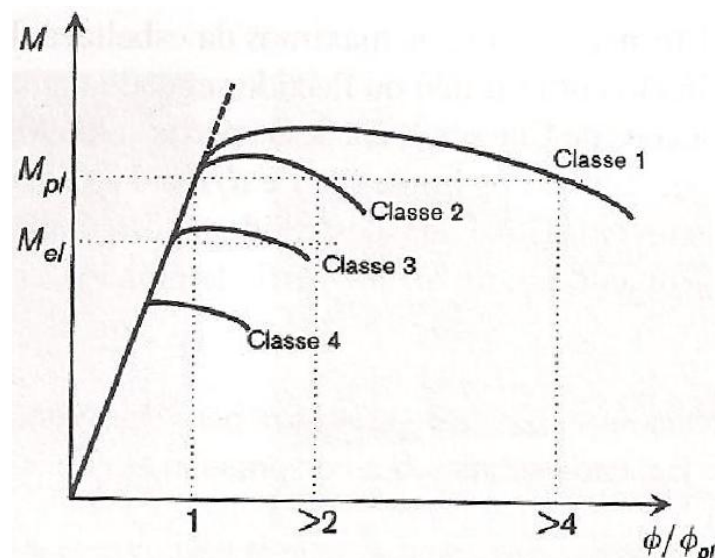


Figura 1.1 - Comportamento de secções à flexão (Vila Real, 2003)

O aço apresenta fraco desempenho a altas temperaturas (Vila Real, 2003). Possui uma condutividade térmica elevada que origina que a temperatura se propague mais rapidamente, e paralelamente as propriedades mecânicas do material degradam-se com este aumento de temperatura. A Figura 1.2 ilustra a consequência destes efeitos numa viga susceptível à encurvadura lateral.

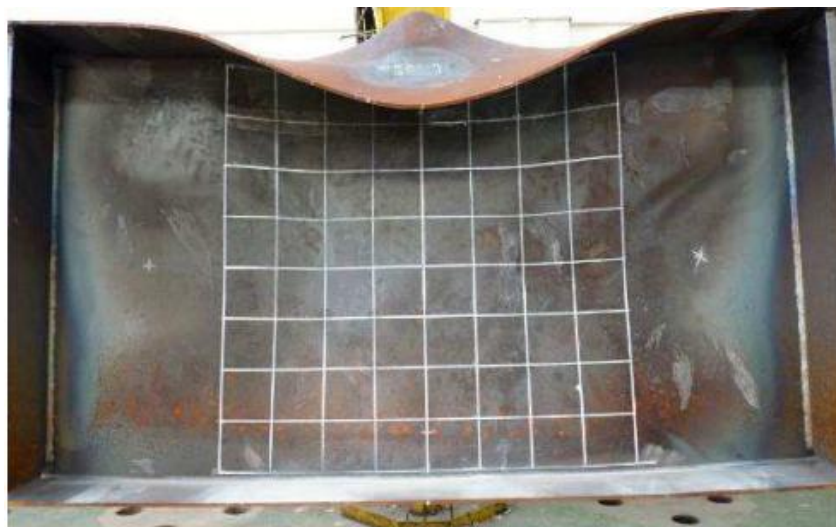


Figura 1.2 - Encurvadura local de uma viga metálica com secção de Classe 4 (Imagem após estudo experimental a altas temperaturas) (Hricák et al, 2014)

Quanto aos estudos desenvolvidos até à data, Piloto (Piloto, 2000) apresentou análise numérica e experimental para a encurvadura lateral de vigas I (de aço de carbono) a altas temperaturas. Na análise experimental concluiu que a curva de cálculo à encurvadura lateral, a temperaturas elevadas que melhor se ajusta aos resultados

obtidos, é a correspondente à proposta que se pretendia validar no estudo (esta possuía resultados mais seguros que a do Eurocódigo). Esta proposta teve como base documentos de aplicação nacionais do Eurocódigo 3 Belga e Francês. Na análise numérica ficou provado que a curva de cálculo à encurvadura lateral do Eurocódigo 3 não é segura a temperaturas elevadas.

Existem estudos recentes sobre o cálculo de secções de Classe 4 a altas temperaturas. As investigações recentes de Knobloch e Fontana e (Knobloch & Fontana., 2006) e Quiel e Garlock (Quiel & Garlock, 2010) concluíram que a metodologia utilizada para o cálculo de secções de Classe 4 a altas temperaturas é conservativa.

Em investigações recentes (Lopes & Vila Real, 2011) foi comparado a lei constitutiva do aço inoxidável determinada através da EN1993-1-2 e a EN1993-1-4 à temperatura ambiente. Concluiu-se que as diferenças nestas leis constitutivas têm influência relativamente pequena nas cargas últimas de elementos estruturais. Supondo que a lei constitutiva mais próxima da realidade é a representada da parte 1-4 do Eurocódigo 3, retira-se que na parte 1-2 os resultados obtidos estão no lado da segurança.

Na sequência dos estudos realizados por (Knobloch & Fontana., 2006) e (Quiel & Garlock, 2010), Couto (Couto et al, 2013) aprofundou esse objeto de estudo. Apresenta propostas com novas expressões para o cálculo da secção efetiva de secções transversais em aço carbono de classe 4 a altas temperaturas validadas através dos resultados numéricos obtidos no estudo, com base nas expressões da EN 1993-1-5. Na base das novas propostas está a consideração da tensão de cedência para uma extensão total de 2% em vez do limite convencional de proporcionalidade de 0,2%.

Entre outros tópicos elaborados referentes a validações de Benchmark, (Hricák et al, 2014) realizou análise experimental e numérica para vigas em aço de carbono com secções de Classe 4 a altas temperaturas. Após os resultados obtidos, conclui que as simulações numéricas e experimentais foram semelhantes, tendo apenas no máximo uma diferença de 3% entre estas na determinação da carga última.

Para vigas em aço inoxidável com secções de Classe 4 sujeitas à encurvadura lateral, (Lopes & Vila Real, 2014) verificaram que a parte 1-2 do Eurocódigo 3, o Anexo Nacional Francês incluída no Eurocódigo 3 e a proposta do Manual EuroInox terão que ser revistos.

Na presente dissertação foi realizado um estudo a vigas em aço inoxidável com secções de classe 4 baseado em análises numéricas sendo criada uma nova proposta com os resultados obtidos. O software utilizado na simulação dos casos estudados foi o SAFIR. Este programa de cálculo automático foi criado e desenvolvido na Universidade de Liège (Franssen, 2005), recorre ao método de elementos finitos e análise não linear para o estudo do comportamento dos elementos.

1.2. Âmbito e Objetivos

Os elementos estruturais em aço inoxidável por norma são secções de paredes finas (Classe 4). A aparência estética está normalmente associada a soluções leves. Apesar do preço inicial, o aço inoxidável possui, de facto, várias características desejáveis num material estrutural, como a resistência à corrosão e a maior resistência ao fogo.

O objetivo principal da dissertação foi de fazer um estudo numérico, com o auxílio do programa SAFIR, do comportamento ao fogo de vigas em aço inoxidável com secções em I de Classe 4. Com esses resultados fazem-se comparações com a metodologia de dimensionamento prevista pelo Eurocódigo 3, assim como a outras propostas, no que se refere mais precisamente ao momento resistente à encurvadura lateral de um elemento sem travamento lateral. Para finalizar apresenta-se uma nova proposta de cálculo com os resultados obtidos assim como a validação da mesma.

1.3. Estrutura da Dissertação

A estrutura da dissertação divide-se em 6 capítulos:

No Capítulo 2 é apresentado o material aço inoxidável com alguns exemplos de aplicações estruturais assim como o seu comportamento mecânico a altas temperaturas.

O Capítulo 3 é destinado ao cálculo estrutural segundo o Eurocódigo 3, desde a resistência da secção até ao cálculo do momento resistente à encurvadura lateral de um elemento sem travamento lateral.

O Capítulo 4 é dedicado à modelação numérica onde se faz uma breve descrição dos programas utilizados e onde se apresentam as propriedades das secções escolhidas assim como a definição do modelo numérico utilizado.

No Capítulo 5 é apresentado o estudo paramétrico elaborado, onde é apresentado a discussão dos resultados segundo alguns parâmetros (tipo de aço, secção transversal e tipo de carregamento) e ainda uma avaliação estatística dos resultados obtidos pelo SAFIR.

Por fim no Capítulo 6 tecem-se as principais conclusões a retirar da presente dissertação e estudos a serem desenvolvidos no futuro.

Capítulo 2

O aço inoxidável

2 O aço inoxidável

2.1 Considerações gerais

2.2 Aplicações Estruturais

2.3 Comportamento mecânico do aço inoxidável a altas temperaturas

2. O aço inoxidável

2.1. Considerações gerais

Existem várias Classes de aço inoxidável que de acordo com a sua estrutura metalúrgica é classificado em 5 grupos: martensíticos, ferríticos, austeníticos, austeníticos/ferríticos (duplex) e endurecidos por precipitação (Euro Inox, 2006). Estes tipos de aço inoxidável diferem na sua composição química como mostra a Figura 2.1. Note-se que o aço que apresenta maior percentagem de níquel é o austenítico, e o que apresenta a menor percentagem é o ferrítico.

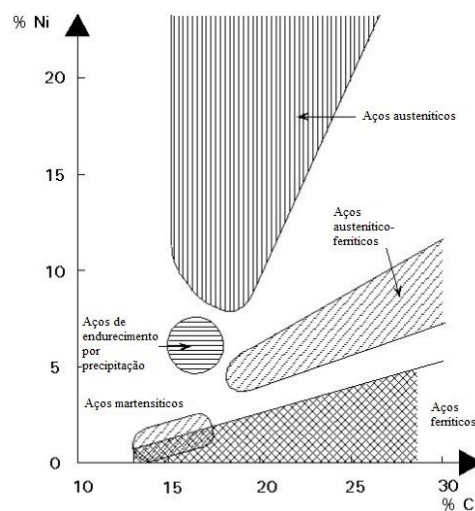


Figura 2.1 – Tipos de aço inoxidável (ESDEP, 2000)

Os austeníticos fornecem uma boa combinação de corrosão e resistência às cargas. Os ferríticos ao terem uma baixa percentagem de Níquel origina a que o seu preço reduza, mantendo uma boa resistência à corrosão assim como a sua resistência estrutural. Os aços inoxidáveis duplex possuem uma elevada resistência estrutural e resistência ao desgaste, e uma boa resistência à corrosão sob tensão. Os grupos mais usados de aços inoxidáveis são o 1.4301 (também conhecido como 304) e o 1.4401 (conhecido como 316), que são austeníticos. Este grupo é o mais usado nas aplicações estruturais mas recentemente houve um aumento do uso dos ferríticos para propostas estruturais que mencionavam grandes vantagens no seu uso (Rossi, 2010).

O preço de mercado do aço austenítico é alto e isso deve-se fundamentalmente ao preço elevado do níquel. Normalmente esta categoria de aço inoxidável é composta por 8-13% de níquel, contrariamente aos ferríticos que é bem mais reduzida (Euro Inox, 2006). Desta forma estes últimos, mais recentemente, têm uma maior procura na sua utilização.

Aliado ao custo inicial elevado deste material, existem também outros fatores preponderantes para a menor utilização deste material comparativamente ao aço de carbono: regras de dimensionamento limitadas, número reduzido de secções disponíveis e falta de conhecimento dos benefícios adicionais da sua utilização como material estrutural, promove a não utilização dos mesmos pelos projetistas. conduz a que os projetistas não o utilizem (Gardner, 2005).

A condutibilidade térmica deste material é bem mais baixa que a do aço de carbono. Contudo, a condutibilidade térmica do aço inoxidável aumenta a temperaturas elevadas, que excede o valor do aço carbono aos 1000°C (Ervedal, 2011).

O aço inoxidável é bastante resistente à corrosão quando sujeitos a ambientes mais agressivos (Palacios, 2005) e por isso tem sido utilizado em estruturas localizadas à beira mar, instalações nucleares, químicas, petrolíferas e de águas residuais. Esta resistência resulta de facto de este material conter na sua base uma camada de óxido rica em cromo que se forma espontaneamente à superfície na presença do ar (oxigénio), que quando é danificado (se risca ou corte) a camada superficial regenera-se imediatamente na presença do oxigénio. Outra das características específicas do aço inoxidável é o fato da relação tensão-extensão não ter uma forma linear, contrariamente ao que se sucede no aço de carbono. Desta forma, a tensão de cedência, mesmo não sendo bem definida, é considerada no limite convencional de elasticidade de 0.2%.

A Tabela 2.1 compara as características mecânicas do aço inoxidável 1.4301 com as do aço de carbono S235 (CEN, 2005a, 2006a).

Tabela 2.1- Comparação das propriedades dos aços S235 e 1.4301 à temperatura ambiente		
Propriedades mecânicas	Aço carbono	Aço inoxidável
	S235	1.4301
Tensão de rotura f_u (MPa)	360	520
Tensão convencional de cedência f_y (MPa)	235	210
Extensão após rotura	>15%	40%

A parte EN 1993 1-4 apresenta alguns dos tipos de aço inoxidáveis existentes de acordo com a EN 10088-2 (CEN, 2005c):

Tabela 2.2 - Tipos de aço inoxidável com as classes correspondentes (CEN, 2005c)

Ferríticos	1.4003, 1.4016, 1.4512
Austeníticos	1.4306, 1.4307, 1.4541, 1.4301,
	1.4401, 1.4404, 1.4539, 1.4571,
	1.4432, 1.4435, 1.4311, 1.4406,
	1.4439, 1.4529, 1.4547, 1.4318
Austeníticos-ferríticos	1.4362, 1.4462

De acordo com a mesma norma, estes aços inoxidáveis são também classificados conforme as necessidades de resistência à corrosão como mostra a Tabela 2.3. Esta tabela é utilizada como auxílio aos projetistas de forma a, dependendo da localização do elemento e do ambiente a que está sujeito, utilizar a classe de aço mais adequada.

Tabela 2.3 - Aplicação em função das necessidades de resistência à corrosão (CEN, 2005c)

Classe do aço inoxidável	Rural			Urbana			Industrial			Marinha		
	B	M	A	B	M	A	B	M	A	B	M	A
1.4003	v1	x	x	v1	x	x	x	x	x	x	x	x
1.4301	v	v	v	v	v	(v)	(v)	(v)	x	v	(v)	x
1.4401, 1.4404, 1.4571	o	o	o	o	v	v	v	v	(v)	v	v	(v)
1.4462	o	o	o	o	o	o	o	o	v	o	o	v

Sendo:

- B - ambiente pouco corrosivo;
- M - ambiente medianamente corrosivo;
- A - ambiente altamente corrosivo;
- o - excessivamente corrosivo;
- v - indicado;
- (v) - indicado se tomadas precauções;
- v1 - indicado em apenas aplicações interiores;
- x - sofrerá corrosão excessiva.

2.2. Aplicações Estruturais

Os aços inoxidáveis são utilizados em diversos tipos de aplicações estruturais (bem como em aplicações não estruturais), de modo a aproveitar todas as suas vantagens em relação ao aço carbono.

Está representado na Figura 2.2, um exemplo de uma habitação desenvolvida apenas com elementos estruturais de aço inoxidável, desde a sua fase de construção até ao resultado final.



a)



b)

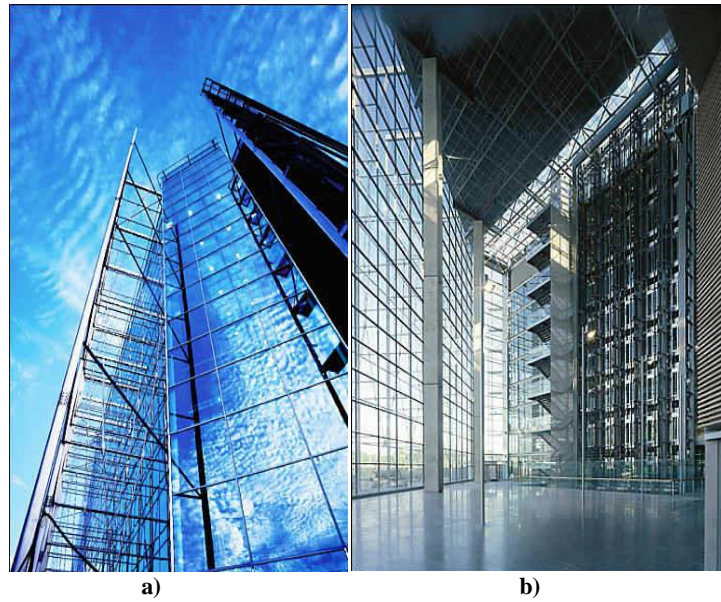


c)

Figura 2.2 - Edifício residencial de aço inoxidável, Finlândia

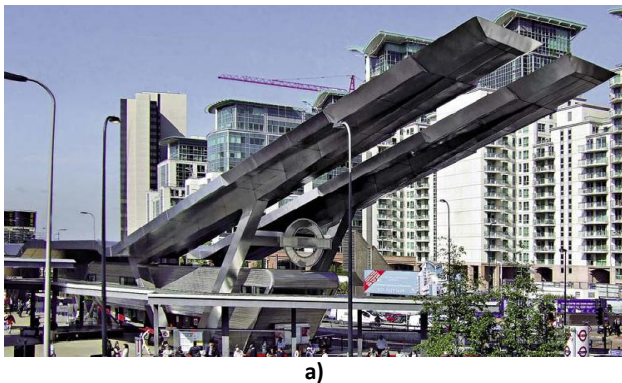
a) Fase final; b) Fase de construção; c) Vista interior (EuroInox, 2000)

Para além da utilização em edifícios de pequenas dimensões, o aço inoxidável é também usado para edifícios de grande porte. A Figura 2.3.(EuroInox, 2000) representa um prédio com um número elevado de andares e onde se observa, em grande parte dos elementos estruturais utilizados, o aço inoxidável.



a) b)
Figura 2.3 - Sanomatalo Building, Finlândia
 a) Vista exterior; b) Vista interior (EuroInox, 2000)

Aliando a conceção estrutural com a não estrutural, é possível observar na Figura 2.4 uma estação de autocarros em Londres. Mais um exemplo em como este material é vantajoso devido às suas características mecânicas e ainda usufruir do seu potencial arquitetónico.



a)



b)

Figura 2.4 - Wauxhall Cross Bus station, Londres
 a) Perspetiva 1; b) Perspetiva 2 (EuroInox, 2000)

Na Figura 2.5 apresenta-se um outro exemplo em que o aço inoxidável é utilizado, neste caso em elementos estruturais. O edifício representado é uma estação de tratamento de águas, situada em Londres. As vigas de aço inoxidável representadas na figura (ainda na

fase de construção do edifício), sendo possivelmente de Classe 4 (objeto de estudo da presente dissertação), servem para suportar tanques de grande porte (estes dando auxílio ao próprio processo de tratamento das águas).



a)



a)



b)

Figura 2.5 - Thames Gateway Water Treatment Water Works, Londres

a) Aplicação de 2 vigas; b) Fase de construção; c) Perspetiva na parte inferior (EuroInox, 2000)

2.3. Comportamento mecânico do aço inoxidável a altas temperaturas

O aço inoxidável (assim como o carbono) quando sujeito a temperaturas elevadas sofre alterações das suas propriedades mecânicas. Com o aumento da temperatura verificam-se reduções na sua resistência e rigidez que tipicamente designam-se por tensão de cedência e módulo de elasticidade linear (CEN, 2005b), como é constatado pelo Anexo C da EN 1993-1-2.

Segundo o EN 1993-1-2, a Figura 2.6 corresponde à representação da relação tensão-extensão do aço inoxidável a altas temperaturas. Está também representado o modo

como se determina uma tensão ou mesmo extensão sabendo uma destas variáveis (a partir do ângulo α representado na figura).

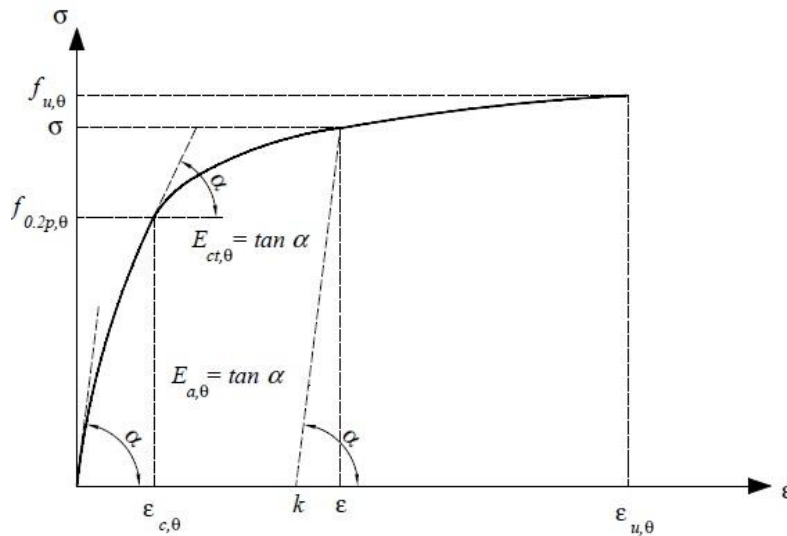


Figura 2.6 – Relação tensão-extensão do aço inoxidável a altas temperaturas (CEN, 2005b)

Nesta relação é possível distinguir-se duas zonas: a primeira é uma zona quase linear até à tensão limite de proporcionalidade de tensão $f_{0,2p,\theta}$ e a segunda é uma curva até à tensão última $f_{u,\theta}$.

De realçar que a tensão de cedência f_y e o módulo de elasticidade E não estão bem definidas, pois o gráfico representativo da lei constitutiva do material é sempre não linear (Lopes & Vila Real, 2011).

Onde $E_{a,\theta}$ é a inclinação da reta que representa o domínio elástico, $E_{ct,\theta}$ representa a inclinação da tensão limite convencional de proporcionalidade, $\epsilon_{c,\theta}$ é a extensão total na tensão limite convencional de proporcionalidade e a $\epsilon_{u,\theta}$ representa a extensão última.

A EN 1993-1-4, que fornece as normas para elementos estruturais de aço inoxidável a frio, refere que a resistência ao fogo é dada pela EN 1993-1-2. Na Figura 2.7 é apresentado a comparação da relação tensão-extensão entre o aço carbono S235 e o aço inoxidável 1.4301 de acordo com a fórmula da lei constitutiva dada por esta parte do Eurocódigo 3 (Lopes et al, 2012).

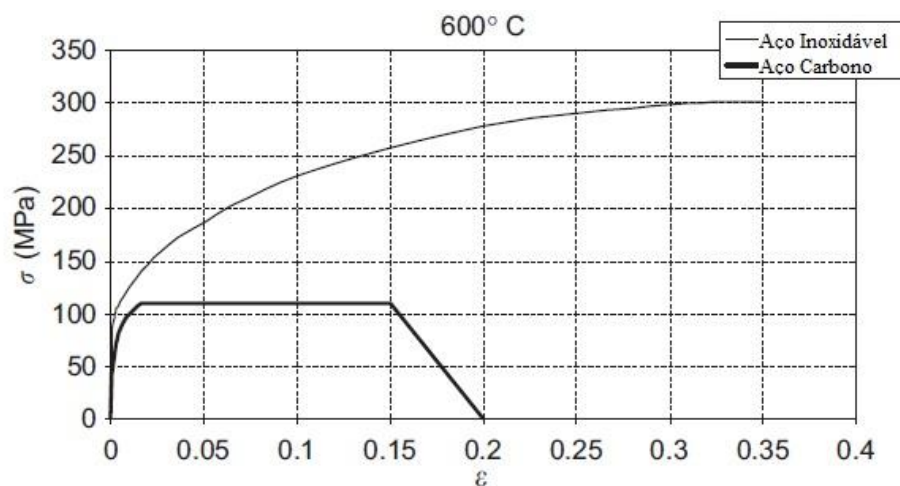


Figura 2.7 – Comparação da relação tensão-extensão para o aço carbono S235 e aço inoxidável 1.4301 a 600°C (Lopes et al, 2012)

Ao analisar esta Figura 2.7, percebe-se que estes aços possuem um comportamento ao fogo diferente entre eles. O aço carbono apresenta um comportamento linear elástico até atingir a tensão de cedência, seguindo-se uma zona de patamar até à tensão de endurecimento (CEN, 2005b). A curva de aço inoxidável possui uma forma mais curva, sendo mais difícil perceber onde é a tensão de cedência comparativamente ao aço carbono. Para tal, segundo a EN 1993-1-2, a tensão definida do aço inoxidável é determinada a partir de um limite de elasticidade definido para uma extensão de 0,2%, apesar de existir estudos recentes onde propõem que o valor desta extensão para secções transversais de Classe 4 em aço de carbono é de 2% em vez do 0,2% (Couto et al, 2013).

Estudos recentes avaliaram as leis constitutivas do aço inoxidável a altas temperaturas e propuseram fórmulas diferentes (Gardner et al, 2010) e (Chen & Young, 2006). No entanto, como esta dissertação tem como objetivo avaliar a metodologia do Eurocódigo 3, irão ser utilizadas as relações existentes da mesma no que se refere à variação de tensão-extensão.

Consultando a EN 1993-1-1 e a EN 1993-1-4, e na comparação das tensões de cedência entre o um aço inoxidável 1.4301 ($f_y = 210$ MPa) e um aço carbono S235 ($f_y = 235$ MPa), observa-se que mesmo a tensão de cedência sendo maior no aço carbono não é suficiente para um melhor comportamento deste. Tal se sucede devido ao aço carbono S235 possuir uma plastificação sem endurecimento, enquanto o aço inoxidável 1.4301 possui uma plastificação com endurecimento.

Na Figura 2.8 observa-se que a variação do fator de redução da tensão limite $k_{0,2p,\theta}$ do aço inoxidável de classe 1.4003 com a temperatura é diferente de todas as outras classes do aço inoxidável (CEN, 2005b).

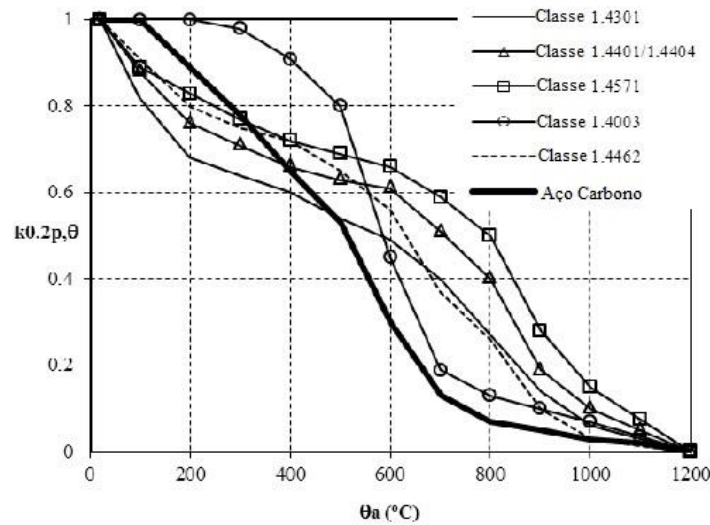


Figura 2.8 – Comparação do $k_{0,2p,\theta}$ entre as várias classes de aço inox e o aço carbono (CEN, 2005b)

A variação do fator de redução do módulo de elasticidade $k_{E,\theta}$ com a temperatura é mostrada na Figura 2.9, onde se observa também a comparação entre o aço inoxidável e o aço carbono. Nota-se claramente nesta figura, assim como tem sido afirmado durante a presente dissertação, o melhor comportamento mecânico do aço inoxidável a altas temperaturas ao nível do módulo de elasticidade do material.

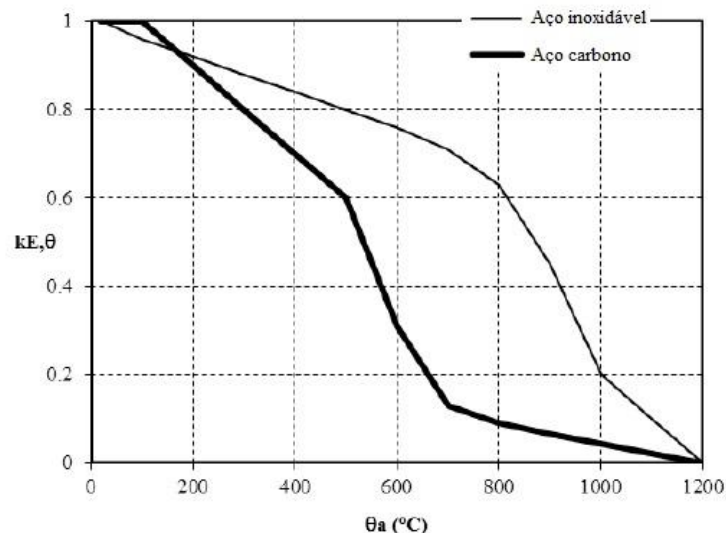


Figura 2.9 – Comparação do $k_{E,\theta}$ entre o aço inox e o aço carbono (CEN, 2005b)

Em suma, o aço inoxidável exibe um melhor comportamento, comparativamente ao aço carbono, nomeadamente em termos mecânicos a altas temperaturas. As maiores

diferenças existem nas propriedades mecânicas, onde há uma alta ductilidade e menores reduções da tensão de cedência e do módulo de elasticidade devido à temperatura.

Capítulo 3

*Cálculo Estrutural para vigas
de aço inoxidável*

3 Cálculo Estrutural para vigas de aço inoxidável

- 3.1 Conceitos e Fundamentos Teóricos
- 3.2 Regras de cálculo existentes à temperatura ambiente
- 3.3 Regras de cálculo existentes em situação de incêndio
- 3.4 Outras propostas de cálculo em situação de incêndio

3. Cálculo Estrutural para vigas de aço inoxidável

3.1. Conceitos e Fundamentos Teóricos

O tema da presente dissertação está implicitamente ligado a um estudo recente realizado por Lopes (Lopes & Vila Real, 2014). Um dos principais objetivos desta dissertação é desenvolver o referido estudo. Alguns aspetos de elevada importância do comportamento ao fogo em secções em I de aço inoxidável de Classe 4 são os fenómenos de encurvadura. Para uma melhor compreensão da existência destes fenómenos de instabilidade, é apresentado na Figura 3.1, a análise do modo de instabilidade que os perfis podem sofrer quando sujeitos a um momento fletor constante (flexão pura).

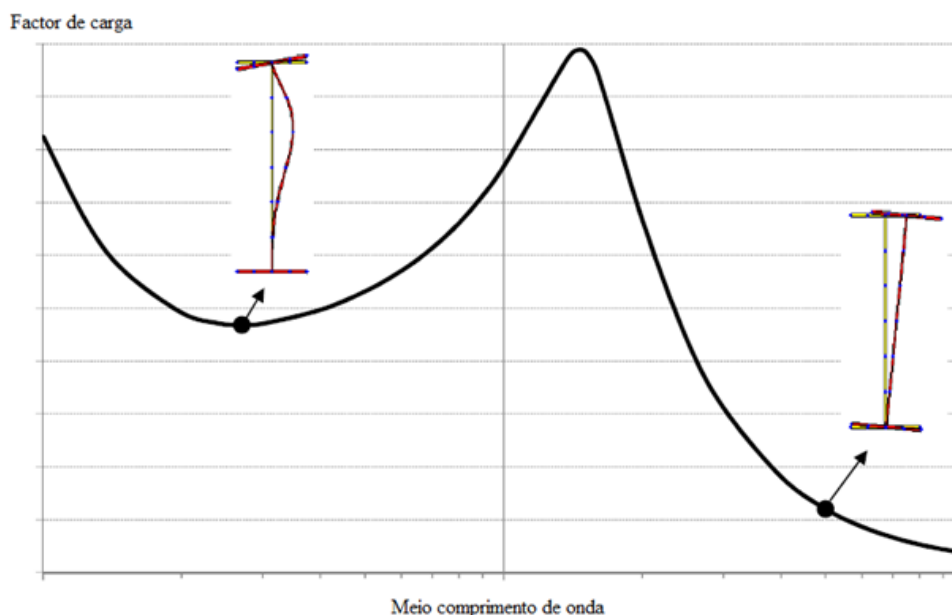


Figura 3.1 – Curva do modo de instabilidade de uma viga (Lopes & Vila Real, 2014)

Os modos de encurvadura local são apresentados para comprimentos de meio período (ou comprimento de onda) menores e a encurvadura lateral para comprimentos de meio período com valores superiores. O fator de carregamento é dado em função da resistência elástica linear da secção.

3.1.1. Encurvadura Local

Este fenómeno é substancialmente importante nas secções que serão tratadas nesta dissertação, secções de Classe 4 (Simões da Silva, 2007). A encurvadura local das secções afeta os resultados da análise global duma estrutura, devendo ser assim

considerada no seu dimensionamento (CEN, 2006b). A EN 1993-1-1 faz referência ainda que nas secções de Classe 4 devem ser incorporados no seu dimensionamento os efeitos da encurvadura local de acordo com o instruído na EN 1993-1-5. As secções transversais da Classe 4 têm uma esbelteza elevada e conseqüentemente é necessário, muitas vezes, adicionar reforços, nomeadamente reforços transversais ou longitudinais, nas almas ou nos banzos (Simões da Silva, 2007).

Para compreender melhor o conceito deste fenómeno é apresentada um exemplo onde ocorre a encurvadura local: em placas comprimidas axialmente.

Relativamente às placas comprimidas axialmente (placas estas não reforçadas), em 1891 Bryan estudou o fenómeno numa placa retangular, com espessura t , simplesmente apoiada no seu contorno e submetida a uma tensão de compressão uniforme conforme representado na Figura 3.2 (Simões da Silva, 2007).

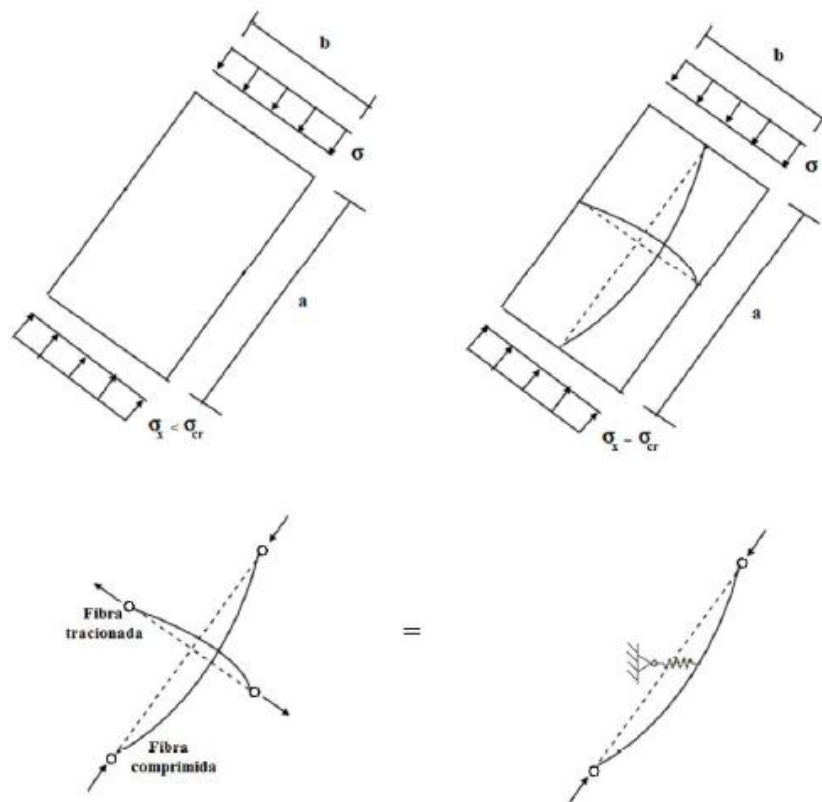


Figura 3.2 – Encurvadura de placa comprimida axialmente (Vila Real, 2010)

Na Figura 3.2 está representado o momento em que a tensão de compressão exercida σ_{ED} na placa é igual ou maior à tensão crítica de encurvadura local σ_{CR} :

$$\sigma_{CR} = k_{\sigma} \frac{E\pi^2}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad (3.1)$$

Onde σ_{CR} representa a tensão crítica de encurvadura local, t é a espessura da placa, b representa o comprimento da fibra na direção perpendicular à carga, k_{σ} é o coeficiente de encurvadura, E representa o módulo de elasticidade e o ν é o coeficiente de Poisson. Se a tensão atuante $\sigma_{ed} < \sigma_{CR}$, não ocorre este fenómeno. Quando estas tensões se igualam, a placa fica sujeita à encurvadura local.

É nesta fase onde se introduz o conceito de *largura efetiva*. Em 1932 Von Karman estudou a avaliação da resistência última de uma placa comprimida uniaxialmente e constatou que a maior parte do carregamento é resistido pelas zonas contíguas aos bordos longitudinais da placa, como ilustra a Figura 3.3 (Simões da Silva, 2007).

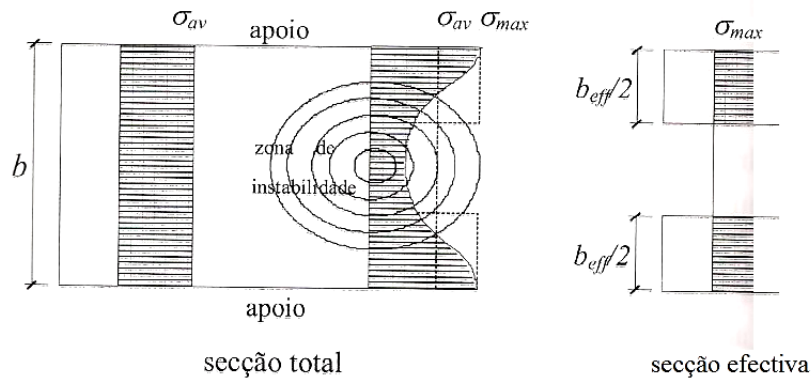


Figura 3.3 – Conceito de largura efetiva (Simões da Silva, 2007)

Segundo Karman, a largura efetiva é "a largura de uma placa fictícia sujeita a uma distribuição uniforme de tensões estaticamente equivalente à distribuição efetivamente instalada na placa real".

3.1.2. Encurvadura Lateral

No dimensionamento de elementos não restringidos lateralmente submetidos à flexão, e no caso de secções em I em que são de baixa rigidez de torção e flexão lateral, é necessário ter em conta a encurvadura lateral pois é sempre condicionado por este fenómeno (Simões, 2005).

Segundo Simões, a encurvadura lateral consiste na “*deformação lateral da parte comprimida de uma secção (banzo comprimido no caso de secções em I ou H) de um elemento sujeito a flexão em torno do eixo y (eixo de maior inércia da secção)*. Nestas condições, a parte comprimida comporta-se como um elemento linear comprimido,

continuamente restringido pela parte tracionada, que à partida não tem qualquer tendência para se deslocar lateralmente.”. Também é denominado por encurvadura lateral-torsional e o melhor exemplo para ilustrar este fenómeno é ter em atenção as situações representadas na Figura 3.4. Onde existe um elemento (viga) perfeitamente encastrado em consola, e que é exercida na ponta uma força pontual de modo à viga encurvar lateralmente e submeter-se à própria torção. A figura ainda ilustra a posição inicial do elemento (antes de aplicar a carga), observando claramente a diferença que existe para a posição final.

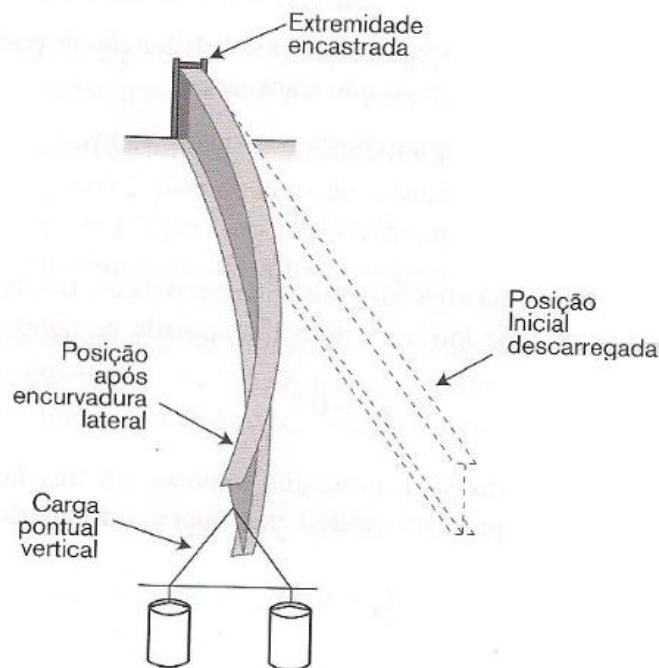


Figura 3.4 – Encurvadura lateral de vigas (Vila Real, 2003)

Condicionado a este fenómeno está o momento crítico, que é o momento máximo que uma viga, em condições ideais, suporta sem encurvar lateralmente. Este momento é determinado segundo a seguinte idealização da viga: simplesmente apoiada, impedida de se deslocar lateralmente e de rodar em torno do eixo nos apoios (apoio em forquilha); livre de empenar em torno dos eixos y e z ; submetida a um momento fletor y ; secção transversal duplamente simétrica; material com comportamento elástico linear e sem qualquer tipo de imperfeições geométricas ou do material. Esta idealização está representada na Figura 3.5.

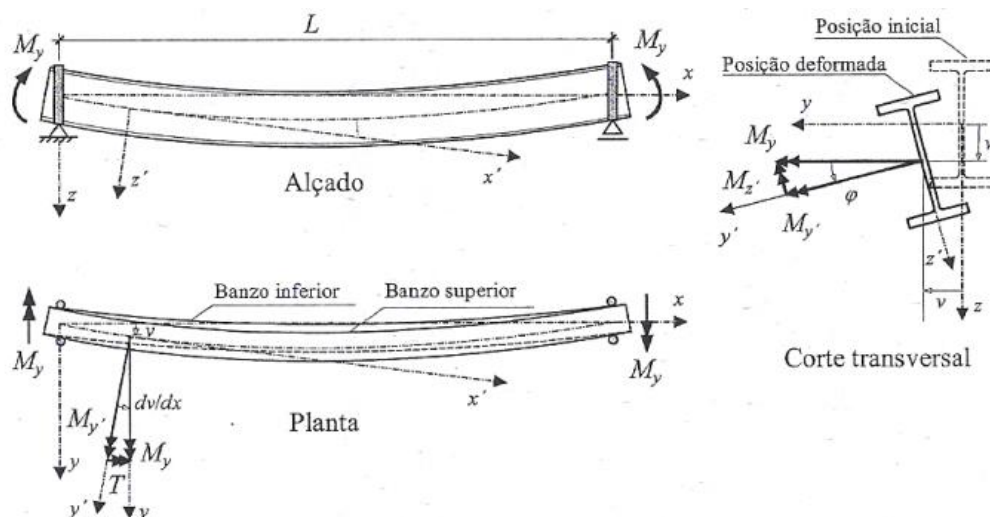


Figura 3.5 – Encurvadura lateral numa viga com secção I duplamente simétrica submetida a momento fletor constante (Simões, 2005)

Ao analisar a figura anterior (onde a encurvadura lateral do elemento está representado em planta, em alçado e num corte transversal) retira-se que neste fenómeno há translações nas secções do elemento em torno dos eixos y e z (corte transversal) assim como uma rotação do próprio eixo do elemento, exceto nas secções dos apoios. O banzo superior está submetido à compressão, disto resulta instabilidades tendo a secção tendência a rodar. Sem existir apoios na parte inferior, toda a secção transversal sofre translações nas direções dos eixos y e z e sofre rotação em torno do eixo do elemento.

De toda a análise deste fenómeno, resulta o momento crítico já referido anteriormente. No capítulo seguinte será mencionado o método de cálculo deste momento, que depende de diversos fatores: forma de carregamento da viga, condições de apoio, rigidez da flexão lateral, rigidez de torção, rigidez de empenamento e comprimento do elemento (Simões, 2005).

3.2. Regras de cálculo existentes à temperatura ambiente

Neste capítulo são apresentadas as metodologias de cálculo de vigas em aço inoxidável adotadas para secções transversais de Classe 4.

3.2.1. Classificação das secções

Segundo o Euródigo 3 (CEN, 2005a), a classificação das secções transversais tem como objetivo identificar em que medida a sua resistência e capacidade de rotação são

limitadas pela ocorrência de encurvadura local. São definidas quatro classes para as secções transversais da seguinte forma:

- Classe 1: são aquelas em que se pode formar uma rótula plástica, com a capacidade de rotação necessária para uma análise plástica, sem redução da sua resistência;
- Classe 2: secções transversais que podem atingir o momento resistente plástico, mas cuja capacidade de rotação é limitada pela encurvadura local;
- Classe 3: são aquelas em que a tensão na fibra extrema comprimida, calculada com base numa distribuição elástica de tensões, pode atingir o valor da tensão de cedência, mas em que a encurvadura local pode impedir que o momento resistente plástico seja atingido;
- Classe 4: secções transversais em que ocorre a encurvadura local antes de se atingir a tensão de cedência numa ou mais partes da secção;

O presente trabalho será focalizado para as secções transversais de Classe 4, embora também sejam tratadas algumas combinações com elementos internos de outras Classes (nomeadamente Classe 2 e 3).

As secções de Classe 4 são definidas pelo facto de os fenómenos de instabilidade local impedirem que se desenvolva toda a capacidade elástica resistente da secção em causa (Simões, 2005). Está ilustrado na Figura 3.6 a representação da secção efetiva das características das secções de Classe 4 (neste caso sendo ambas as partes da secção de Classe 4 - banzo e alma), que representa a área das partes mais suscetíveis de se instabilizar localmente.

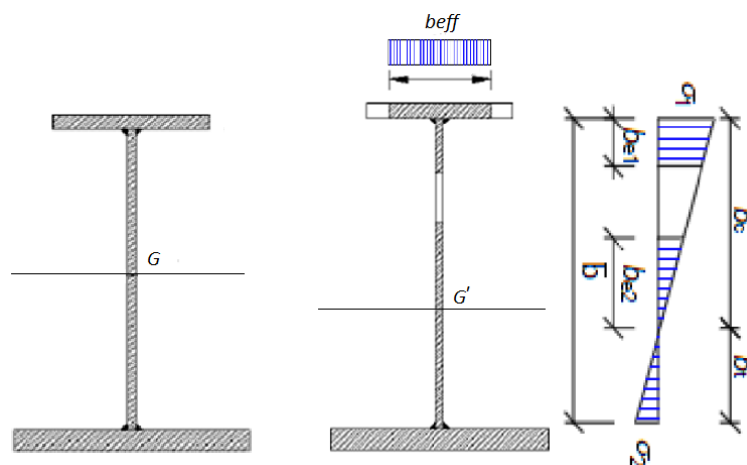
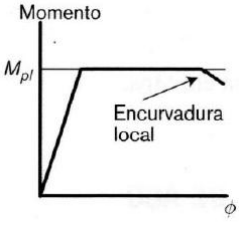
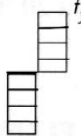
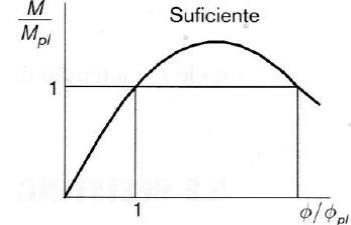
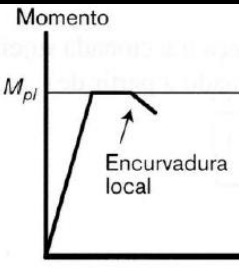
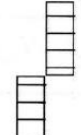
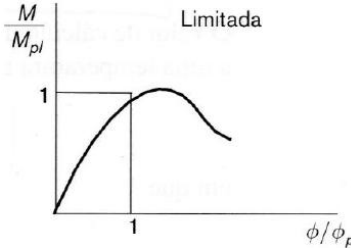
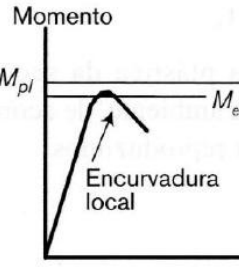

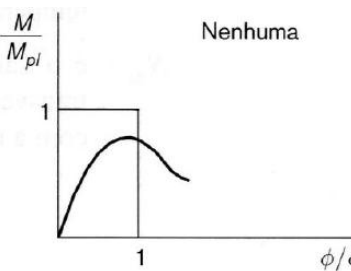
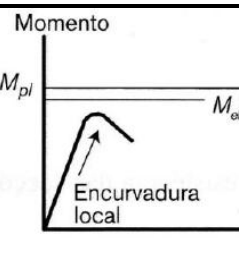

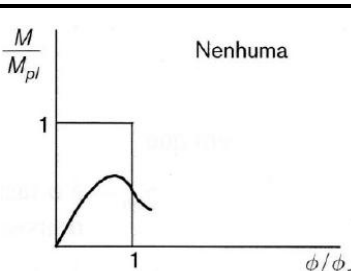


Figura 3.6 - Secção transversal de Classe 4 submetida a momento fletor

A Tabela 3.1 apresenta a classificação das secções transversais em função do respetivo momento resistente e capacidade de rotação.

Tabela 3.1 - Classificação das secções transversais em função do seu momento resistente e da sua capacidade de rotação (Vila Real, 2003)

Modelo de Comportamento	Momento Resistente	Capacidade de Rotação	Classe
	<p>Momento plástico na secção transversal</p> 	<p>Suficiente</p> 	1
	<p>Momento plástico na secção transversal</p> 	<p>Limitada</p> 	2
	<p>Momento elástico na secção transversal</p> 	<p>Nenhuma</p> 	3
	<p>Momento elástico na secção efectiva</p> 	<p>Nenhuma</p> 	4

M_{el} - momento elástico resistente da secção transversal;
 M_{pl} - momento plástico resistente da secção transversal;
 M - momento aplicado;
 ϕ - rotação (curvatura) da secção;
 ϕ_{pl} - rotação (curvatura) da secção requerida para gerar uma distribuição de tensões plásticas total.

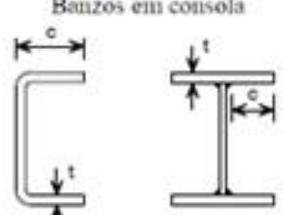
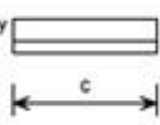
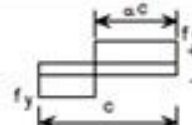
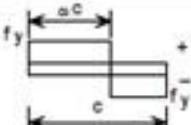
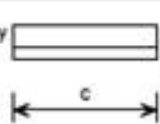
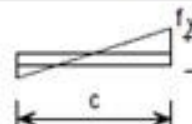
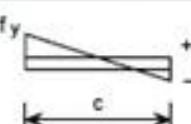
A classificação da secção transversal depende da relação entre a largura e a espessura dos elementos comprimidos (ou parcialmente comprimidos) sob o carregamento a que está sujeita e é classificada segundo a classe mais elevada (mais desfavorável) desses mesmos elementos.

Os valores limite da relação entre as dimensões dos elementos comprimidos das Classes 1, 2 e 3 estão indicados na Tabela 3.2 para elementos internos (alma) e na Tabela 3.3 para elementos salientes (banzos) (CEN, 2006a). Caso um elemento não cumpra os requisitos da Classe 3 é então considerado como sendo de Classe 4. Estes limites diferem dos referentes ao aço carbono.

Tabela 3.2 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (alma) (CEN, 2006a)

Componentes internos comprimidos				
Classe	Componente sollicitado à flexão	Componente sollicitado à compressão	Componente sollicitado à flexão e à compressão	
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)				
1	$c/t \leq 56,0\epsilon$	$c/t \leq 25,7\epsilon$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{308\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{28\epsilon}{\alpha}$	
2	$c/t \leq 58,2\epsilon$	$c/t \leq 26,7\epsilon$	quando $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{320\epsilon}{13\alpha - 1}$ quando $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{29,1\epsilon}{\alpha}$	
Distribuição das tensões nos componentes (compressão negativa)				
3	$c/t \leq 74,8\epsilon$	$c/t \leq 30,7\epsilon$	$c/t \leq 15,3\epsilon\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ ver EN 1993-1-5	
$\epsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]$	Classe	1.4301	1.4401	1.4462
	f_y (N/mm ²)	210	220	460
	ϵ	1,03	1,01	0,698

Tabela 3.3 - Limites máximos das relações largura-espessura para componentes comprimidos (banzos) (CEN, 2006a)

<div style="text-align: center;">  <p>Banzos em consola</p> </div>				
Classe	Secção tipo	Componente solicitado à compressão	Componente solicitado à flexão e à compressão	
			Extremidade comprimida	Extremidade traçionada
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)				
1	Enfor - mados a frio	$c/t \leq 10e$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soldados	$c/t \leq 9e$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
2	Enfor - mados a frio	$c/t \leq 10,4e$	$c/t \leq \frac{10,4e}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
	Soldados	$c/t \leq 9,4e$	$c/t \leq \frac{9,4e}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9,4e}{\alpha\sqrt{\alpha}}$
Distribuição das tensões nos componentes (compressão positiva)				
3	Enfor - mados a frio	$c/t \leq 11,9e$	$c/t \leq 18,1e\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ ver EN 1993-1-5	
	Soldados	$c/t \leq 11e$	$c/t \leq 16,7e\sqrt{k_\sigma}$ Para k_σ ver EN 1993-1-5	
$\epsilon = \left[\frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Classe		1.4301	1.4401
	f_y (N/mm ²)		210	220
	ϵ		1,03	1,01
				1.4462
				460
				0,698

Segundo o ponto 5.2.3. da EN 1993-1-4 (CEN, 2006a), as secções efetivas (as de Classe 4) são determinadas segundo a EN 1993-1-5 (ponto 4.3.) onde é aplicado o método das larguras efetivas para ter em conta as reduções de resistência devidas aos efeitos da encurvadura local, mas com as seguintes alterações:

Para elementos internos:

$$\rho = \frac{0,722}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (3.2)$$

Para elementos salientes:

Enformados a frio

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (3.3)$$

Soldadas

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \quad (3.4)$$

Com:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}} \quad (3.5)$$

Em que \bar{b} é a largura livre do elemento e t a espessura do elemento.

Tabela 3.4 - Elementos internos comprimidos (almas) (CEN, 2006b)

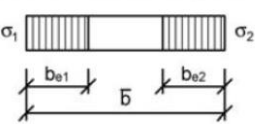
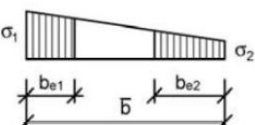
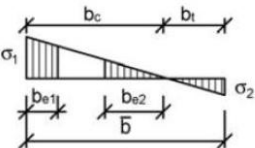
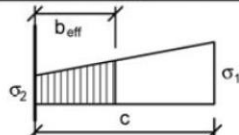
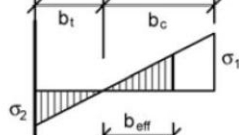
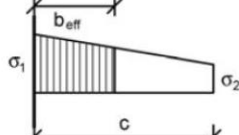
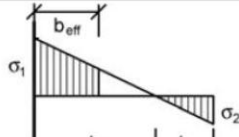
Distribuição de tensões (compressão positiva)				Largura efectiva: b_{eff}		
				$\psi = 1$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0$: $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{eff}$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$		
				$\psi < 0$: $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0,6 b_{eff}$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Factor encurvad. k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$

Tabela 3.5 - Elementos externos comprimidos (banzos) (CEN, 2006b)

Distribuição de tensões (compressão positiva)		Largura efectiva: b_{eff}			
		$1 > \psi \geq 0$:			
		$b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0$:			
		$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Factor de encurvad.: k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$:			
		$b_{eff} = \rho c$			
		$\psi < 0$:			
		$b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1-\psi)$			
$\psi = \sigma_2/\sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Factor de encurvad.: k_σ	0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

3.2.2. Resistência da secção

Segundo a EN 1993-1-1 (CEN, 2005a) no ponto 6.2.5, o valor de cálculo do momento fletor atuante M_{Ed} em cada secção transversal deve satisfazer a seguinte condição:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (3.6)$$

em que o valor de cálculo do momento fletor resistente de uma secção transversal $M_{c,Rd}$ de Classe 4 em relação a um dos eixos principais é determinado do seguinte modo:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.7)$$

sendo o $\gamma_{M0} = 1$ e o módulo de flexão efetiva $W_{eff,min}$ calculado a partir de:

$$W_{eff,y} = \min (W_{eff,sup}; W_{eff,inf}) \quad (3.8)$$

$$W_{eff,sup} = \frac{I_{eff,y}}{v_s} \quad (3.9)$$

$$W_{eff,inf} = \frac{I_{eff,y}}{v_i} \quad (3.10)$$

Onde $I_{eff,y}$ representa a inércia efetiva segundo o eixo forte yy , a partir da secção efetiva do perfil; v_s e v_i são as distâncias desde o centro de gravidade da secção transversal até ao banzo superior e inferior respetivamente.

3.2.3. Resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral

Segundo a EN 1993-1-1 (CEN, 2005a), nos casos em que existe flexão pura (Figura 3.7) e com ocorrência de encurvadura lateral, a resistência deve ser reduzida de forma a ter em conta este fenómeno de instabilidade. Logo a mesma norma prevê a seguinte verificação:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1 \quad (3.11)$$

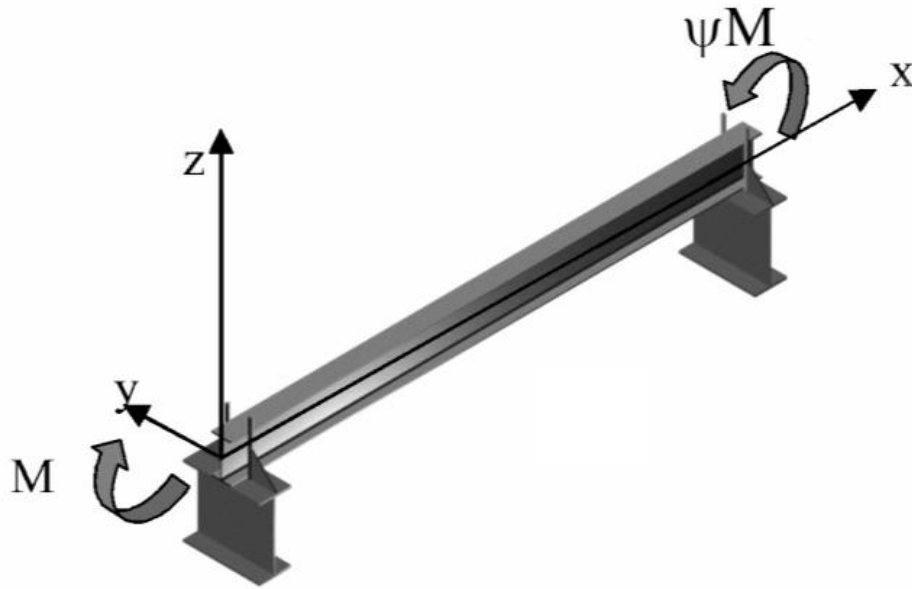


Figura 3.7 - Viga simplesmente apoiada sujeita à flexão simples (Vila Real, 2003)

Sendo o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral de um elemento sem travamento lateral para secções transversais de Classe 4:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT,mod} W_{eff,y} f_y \frac{1}{\gamma_{M1}} \quad (3.12)$$

Onde $\chi_{LT,mod}$ é o coeficiente de redução para encurvadura lateral; $W_{eff,y}$ representa o módulo de flexão efetivo segundo o eixo forte – yy – e f_y representa a tensão de cedência do aço.

Sendo $\chi_{LT,mod}$ determinado a partir da EN 1993-1-4 (CEN, 2006a):

$$\chi_{LT,mod} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{[\phi_{LT}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT}]^2}} \leq 1 \quad (3.13)$$

Com:

$$\phi_{LT} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{LT} - 0.4) + (\bar{\lambda}_{LT})^2 \right] \quad (3.14)$$

O α toma o valor de 0,76 para elementos soldados. Se o $\bar{\lambda}_{LT}$ tomar valores menores que 0,4 ou $\frac{M_{Ed}}{M_{CR}}$ for menor que 0,16, a verificação da resistência à encurvadura lateral deve ser ignorada.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} f_y}{M_{Cr}}} \quad (3.15)$$

Com M_{CR} a representar o momento crítico elástico de encurvadura lateral, que se baseia nas propriedades da secção bruta e tem em consideração as condições de carregamento, a distribuição real dos momentos fletores e os travamentos laterais, sendo determinando a partir de (sendo $k = k_w = 1$ para as condições de apoio) (Simões da Silva, 2007):

$$M_{Cr} = C_1 \frac{E\pi^2 I_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} \quad (3.16)$$

Sendo I_t a inércia de torção, I_w a inércia de empenamento e C_1 um coeficiente que depende do carregamento e condições de apoio, dado pelo Anexo F da ENV 1993-1-1.

3.3. Regras de cálculo existentes em situação de incêndio

Neste capítulo são apresentadas as metodologias adotadas para secções transversais de Classe 4 em situação de incêndio.

3.3.1. Classificação das secções

No caso em que os perfis metálicos se encontram em situação de incêndio, a classificação das secções transversais devem ser tal como à temperatura normal mas em que o valor reduzido de ε é obtido da seguinte forma (CEN, 2005b):

$$\varepsilon = 0,85 \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} \quad (3.17)$$

Onde f_y representa a tensão de cedência a 20°C.

A altas temperaturas aplica-se a secção efetiva calculada para temperatura normal.

A EN 1993-1-2 refere que valor de ϵ a altas temperaturas é dada pela expressão anterior, mas não tem em conta os fatores de redução $k_{0,2p,\theta}$ e o $k_{E,\theta}$ (valores menores que um em que minoram a tensão de cedência f_y e o módulo de elasticidade E do aço, respetivamente) sendo que poderia ser determinado pela seguinte expressão:

$$\epsilon_{\theta} = \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} \sqrt{\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}} \quad (3.18)$$

A constante 0.85, em princípio, terá em conta estas variáveis apesar de não ser o correto já que estaríamos a admitir que todos as classes dos aços inoxidáveis teriam o mesmo valor tanto da f_y como do E . Na Figura 3.8 é apresentado um gráfico onde está assinalada a constante de 0,85 referente ao Eurocódigo e os valores de $\sqrt{\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}}$ em função da temperatura. Observa-se que o Eurocódigo está seguro, podendo ter uma constante com um valor mais elevado.

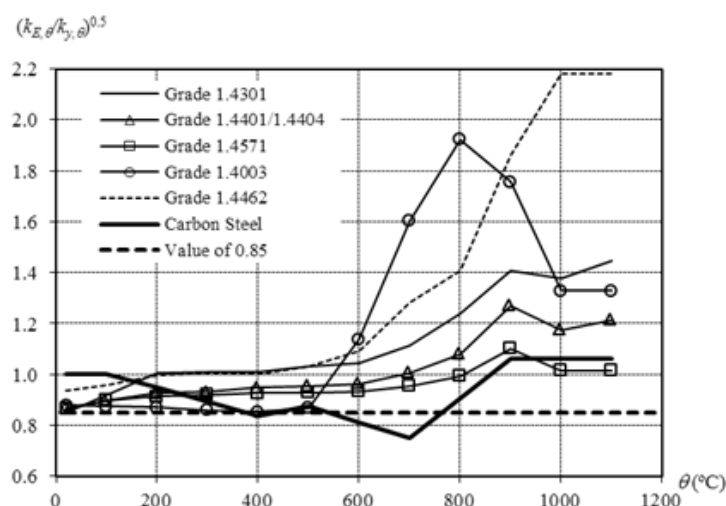


Figura 3.8 - Variação do valor $\sqrt{\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}}$ das 5 classes do aço inoxidável com o aumento da temperatura (Lopes, 2009)

3.3.2. Resistência da secção

Segundo o Anexo E da EN 1993-1-2 (CEN, 2005b), para o cálculo em situação de incêndio, o valor de cálculo da tensão de cedência deverá ser considerada igual à tensão limite convencional de proporcionalidade a 0.2%

No ponto E.2.(4) refere que o valor de cálculo da tensão de cedência a altas temperaturas $f_{0,2p,\theta}$ de para secções transversais de Classe 4 é determinado usando:

$$k_{0,2p,\theta} = f_{0,2p,\theta} / f_y \quad (3.19)$$

sendo $k_{0,2p,\theta}$ o fator de redução de redução de cálculo determinado a partir do Quadro C1 do Anexo C da norma referida anteriormente.

O Anexo E refere num dos pontos que a área da secção transversal efetiva e o módulo de flexão efetivo deverão ser determinados em conformidade com a EN 1993-1-3 e a EN 1993-1-5, ou seja, com base nos materiais a frio.

No que se refere a secções transversais de Classe 4, a EN 1993-1-2 indica que para temperaturas até 350°C (na ausência de informação usa-se a temperatura crítica, sendo equivalente a 350°C - valor recomendado) deve-se utilizar a seguinte condição:

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (3.20)$$

em que $E_{fi,d}$ ($M_{fi,d}$) representa o valor do momento atuante no instante t a altas temperaturas e $R_{fi,d,t}$ ($M_{fi,t,Rd}$) o valor de cálculo do momento resistente no instante t com uma temperatura uniforme.

3.3.3. Resistência do elemento sujeito à encurvadura lateral

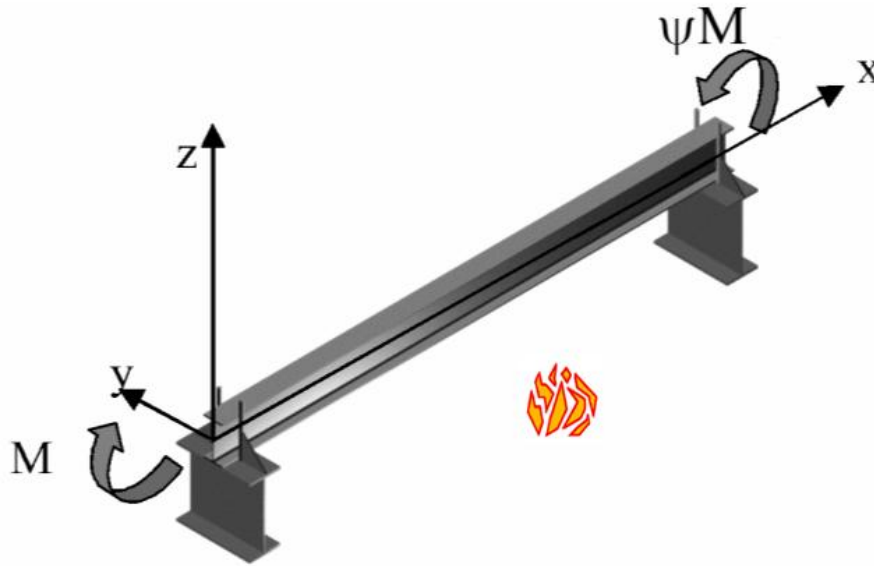


Figura 3.9 - Viga simplesmente apoiada sujeita à flexão simples a altas temperaturas (Vila Real, 2003)

O valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral no instante t de um elemento sem travamento lateral de uma secção transversal de Classe 4 deverá ser determinado a partir de (Anexo E da EN 1993-1-2):

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} W_{eff,y} k_{0,2p,\theta} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.21)$$

Onde $\chi_{LT,fi}$ é o coeficiente de redução para encurvadura lateral em situação de incêndio; $W_{eff,y}$ representa o módulo de flexão efetivo segundo o eixo forte – yy; $k_{0,2p,\theta}$ é o fator de redução para a tensão de cedência do aço de secções de Classe 4 à temperatura máxima no banzo comprimido θ_a atingida no instante t e f_y representa a tensão de cedência do aço.

Sendo $\chi_{LT,fi}$ determinado a partir de:

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta}]^2}} \quad (3.22)$$

com

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (3.23)$$

sendo

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (3.24)$$

Seguidamente é necessário calcular a $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ sendo:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (3.25)$$

Onde $k_{0,2p,\theta}$ representa o valor de cálculo da tensão de cedência:

$$k_{0,2p,\theta} = \frac{f_{0,2p,\theta}}{f_y} \quad (3.26)$$

E $k_{E,\theta}$ é a inclinação da reta que representa o domínio elástico:

$$k_{E,\theta} = \frac{E_{a,\theta}}{E_a} \quad (3.27)$$

Na Figura 3.10, onde é possível ver a relação da variável $\sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}}$ com o aumento da temperatura. Esta análise é feita com o objetivo de perceber qual a diferença entre o cálculo a frio e o comportamento ao fogo segundo a EN 1993-1-1 e a EN 1993-1-2 na seguinte expressão:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (3.28)$$

Em que $\bar{\lambda}_{LT}$ representa a esbelteza normalizada para a encurvadura lateral (CEN, 2005a) e $\bar{\lambda}_{LT,\theta}$ é a mesma esbelteza mas ao fogo (CEN, 2005b). É intuitivo perceber que

existe um decréscimo ao longo do aumento da temperatura deste fator (embora nem sempre linear, onde percebe-se que se acentua mais entre os 600°C e os 800°C), o que indica que a esbelteza normalizada ao fogo irá ser sempre inferior do que à temperatura normal. De notar ainda que o aço inoxidável de Classe 1.4003 tem um comportamento diferente de todos os outros na primeira fase de aquecimento (até aos 450°C).

Para o dimensionamento ao fogo o Eurocódigo 3 prevê a utilização da secção efetiva calculada à temperatura normal (CEN, 2006b), com base no facto de que no aço carbono a relação da variável $\sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}}$ ser perto de 1. Esta relação é importante para o cálculo da esbelteza de placas pois na realidade no aço inoxidável esta igualdade não se verifica, o que leva a pressupor que deveria ser diferente a metodologia de cálculo utilizada.

A Tabela 3.6 apresenta os valores de $k_{0,2p,\theta}$ (valor de cálculo da tensão de cedência) e $k_{E,\theta}$ (inclinação da reta que representa o domínio elástico) da Classe 1.4301 pertencente ao aço inoxidável:

Tabela 3.6 - Fatores para a determinação da extensão e da rigidez do aço inoxidável Classe 1.4301 a temperaturas elevadas (CEN, 2005b)

Temperatura do aço	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100
$k_{E,\theta}$	1,00	0,96	0,92	0,88	0,84	0,80	0,76	0,71	0,63	0,45	0,20	0,10
$k_{0,2p,\theta}$	1,00	0,82	0,68	0,64	0,60	0,54	0,49	0,40	0,27	0,14	0,06	0,03

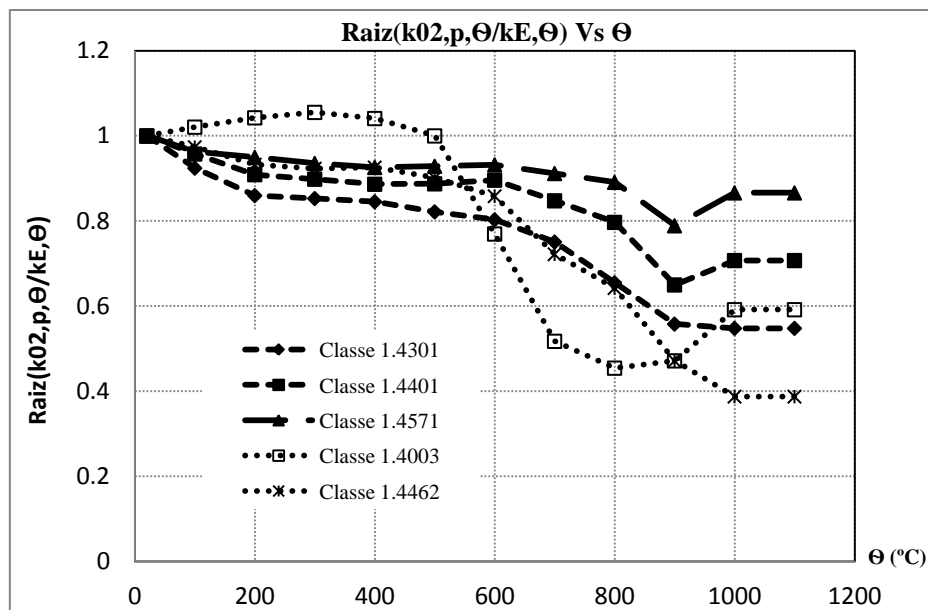


Figura 3.10 - Variação do valor $\sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}}$ das 5 classes do aço inoxidável com o aumento da temperatura

3.4. Outras propostas de cálculo em situação de incêndio

3.4.1. Anexo Nacional Francês do Eurocódigo 3 para Classe 4

Para o dimensionamento de secções de Classe 4 (quer sejam em aço carbono ou aço inoxidável), o anexo nacional Francês da EN 1993-1-2 (CEN, 2006b) propõe o uso da seguinte expressão:

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{LT,\theta} - 0,2) + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (3.29)$$

com:

$$\alpha = 0,34$$

Sendo α o fator de imperfeição. Todas as restantes equações são determinadas com a mesma metodologia e expressões do Eurocódigo.

3.4.2. Manual EuroInox para todas as Classes

O Design Manual for Structure Stainless Steel (Euro Inox, 2006) propõe o uso da seguinte expressão para todas as Classes de secções em aço inoxidável:

$$\phi_{LT,\theta} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{LT,\theta} - 0,4) + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (3.30)$$

Com:

$$\alpha = 0,76$$

Sendo α o fator de imperfeição. Todas as restantes equações são determinadas com a mesma metodologia e expressões do Eurocódigo.

3.4.3. Proposta para perfis I de Classes 1 e 2

Uma das propostas da Universidade de Aveiro (Vila Real et al, 2008) para o valor de cálculo do momento resistente à encurvadura lateral de um elemento sem travamento lateral a substituir nas normas regulamentares (capítulo 4.1.1.) é:

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi,mod} W_{pl,y} k_{y,\theta} f_y \frac{1}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.31)$$

onde:

$$\chi_{LT,fi,mod} = \frac{\chi_{LT,fi}}{f} \quad (3.32)$$

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \quad (3.33)$$

Os valores de k_c , fatores corretivos para situação de incêndio, podem ser consultado na Tabela 3.7 apresentada a seguir.

Tabela 3.7 - Valores para o fator corretivo (Vila Real et al, 2008)}

Distribuição de momentos $-1 \leq \Psi \leq 1$	k_c
	$0.6 + 0.3 \Psi + 0.15 \Psi^2$ mas $k_c < 1$
	0.91
	0.9
	0.91
	0.79
	0.73
	0.75
Nota: para outros diagramas $k_c = 1$	

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,\theta} + \sqrt{[\phi_{LT,\theta}]^2 - [\bar{\lambda}_{LT,\theta}]^2}} \quad (3.34)$$

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,\theta} + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (3.35)$$

$$\alpha = \eta \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} \sqrt{\frac{k_{E,\theta}}{k_{y,\theta}}} \quad (3.36)$$

O fator η é determinado pela seguinte expressão:

$$\eta = 0,22 \left(\frac{h}{b} \right) + 0,38 \text{ para o aço 1.4301} \quad (3.37)$$

$$\eta = 0,16 \left(\frac{h}{b} \right) + 0,34 \text{ para os aços 1.4003 e 1.4462} \quad (3.38)$$

sendo h e b correspondente à altura e base da secção, respectivamente.

3.4.4. Nova proposta para perfis I de Classe 4

Um dos principais objetivos da presente dissertação é, com os resultados numéricos obtidos, apresentar uma nova proposta de acordo com esses mesmos resultados. Posto isto, a expressão idealizada é a seguinte:

$$\phi_{LT,\theta,com} = \frac{1}{2} \cdot \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{LT,\theta} - 0,2) + (\bar{\lambda}_{LT,\theta})^2 \right] \quad (3.39)$$

onde

$$\alpha = 0,65 \sqrt{\frac{235}{f_y} \frac{E}{210000}} \quad (3.40)$$

Sendo α o fator de imperfeição, f_y a tensão de cedência e E o módulo de elasticidade. O fator f também é incluído nesta nova proposta, seguindo parte da metodologia usada na proposta da UA: desde a equação (3.28) até à equação (3.30), auxiliada pela Tabela 3.7 também. Todas as restantes equações são determinadas com a mesma metodologia e expressões do Eurocódigo.

A formulação desta expressão teve como base a seguinte explicação: os resultados numéricos obtidos possuem os valores das primeiras esbeltezas perto do Anexo Nacional Francês, onde tem um "patamar" até ao valor de 0,2 (ver Figura 5.1).

O valor de α para os resultados obtidos tem semelhanças comparativamente à proposta da UA (observando a mesma figura, deteta-se que a concavidade do gráfico desta proposta é semelhante à concavidade produzida pelos resultados numéricos). Optou-se por não definir exatamente a mesma expressão de α referente à proposta da UA, mas sim uma mistura desta com a do Eurocódigo (ver equação 3.22). Em suma, ao valor de α definido pelo Eurocódigo, adicionou-se parte do valor α referente à proposta da UA ($\sqrt{\frac{E}{210000}}$). No Capítulo 5 será apresentada a validação da nova proposta.

Capítulo 4

Modelação Numérica

4 Modelação Numérica

4.1 Considerações gerais

4.2 Casos de estudo

4.3 Propriedades da secção

4.4 Definição do modelo numérico

4. Modelação Numérica

4.1. Considerações gerais

A análise estrutural da resistência ao fogo pode ser determinada usando programas de cálculo com vários graus de complexidade. Estes programas podem ir desde os métodos de cálculo mais simplificados (definido nos Eurocódigos) até aos mais complexos baseados no Método dos Elementos Finitos (MEF). O software usado na análise numérica neste trabalho foi o SAFIR (Franssen, 2007), onde seguidamente é descrita a sua base de funcionamento. O Ruby (Couto et al, 2013), um software de interface para a execução da análise de encurvadura de modelos SAFIR (recorrendo ao Cast3M), também foi utilizado neste trabalho, com o objetivo de resolver as análises de encurvadura produzidas pelo SAFIR.

4.1.1. Descrição geral do programa SAFIR

O programa SAFIR (Franssen, 2007) é utilizado essencialmente para análise de estruturas à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas, baseando-se no MEF. Este método possui como base equações integrais com as respetivas condições de apoio em que consiste na divisão do domínio da integração em um número finito de pequenas regiões. Paralelamente, o SAFIR realiza análise geométrica e material não-linear.

Como programa de elementos finitos, o SAFIR pode incluir vários elementos de várias idealizações, tendo como base o comportamento tensão-extensão de alguns materiais. O software possui 2 módulos distintos de cálculo: um para análise do comportamento térmico e outro para a análise do comportamento mecânico do elemento. A evolução não uniforme da temperatura é calculada para cada tipo de secção existente na estrutura (análise térmica). Seguidamente o módulo do comportamento mecânico do programa lê estas temperaturas e determina o comportamento termodinâmico da estrutura numa análise incremental. Para o caso de elementos de viga tridimensional é necessário uma análise à torção, antes da análise mecânica.

No presente trabalho foram utilizados elementos de casca em todas as vigas, com o objetivo de ser estudado os fenómenos de encurvadura do elemento estrutural, sendo o elemento casca tratado como elemento finito.

O uso de elementos finitos de casca é o método mais preciso no estudo do comportamento de elementos estruturais de paredes finas (Franssen, 2007). Para modelar os membros de paredes finas, o SAFIR possui o elemento casca com base na teoria de flexão Kirchhof. Estes elementos são caracterizados pela capacidade de combinar um estado de resistência à flexão com um estado de resistência à força axial no meio da superfície. O elemento de casca no SAFIR tem quatro pontos de integração na superfície do elemento, representado na Figura 4.1. Em cada direção, a integração é feita pelo método de Gauss. O número integrações na espessura pode ser escolhida pelo utilizador, podendo ir desde as 2 até 9 camadas. O elemento tem na sua constituição quatro nós com seis graus de liberdade cada um: três deslocamentos e três rotações.

Este elemento finito foi introduzido inicialmente em materiais como o betão e o aço carbono, mas neste trabalho será utilizado o aço inoxidável.

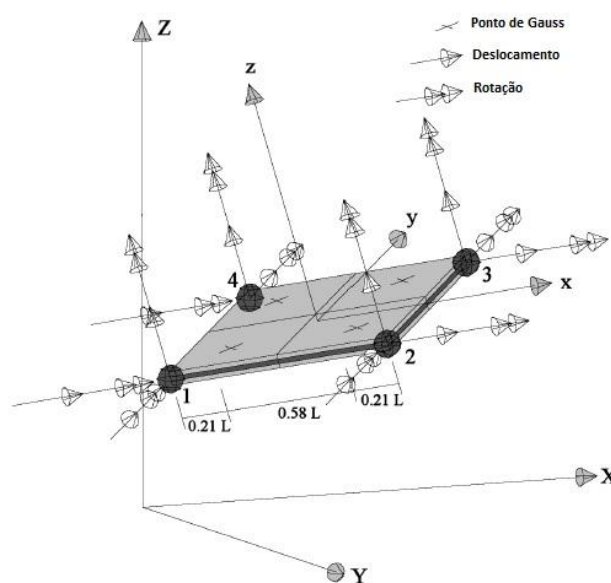


Figura 4.1 - Elemento finito de casca (Lopes, 2009)

4.1.2. Descrição geral do programa Cast3M + Ruby

Cast3M é um software desenvolvido pelas Energias Alternativas Francesas e Comissão da Energia Atômica (CEA). É um código de computador para a solução de equações diferenciais parciais, assim como para a análise de estruturas, pelo método dos elementos finitos (Le Fichoux, 1998). Os seus principais domínios de aplicação são a mecânica estrutural, mecânica dos fluídos, problemas térmicos e magnetismo.

Este software integra não só a computação dos próprios processos, como também as funções da construção do modelo (pré-processamento) e as funções do processamento de resultados (pós-processamento). Cast3M é um programa que o usuário pode adaptar-se às suas necessidades para resolver os seus próprios problemas.

O principal objetivo deste código é lidar com problemas não-lineares mecânicos, tais como: plasticidade, encurvadura, deformação, análise sísmica, pós-encurvadura, entre outros. As estruturas podem ser modelados em 2D ou 3D, sendo que contém uma vasta gama de leis de comportamento dos materiais (entre eles aço inoxidável e de carbono).

Neste trabalho, o uso do Cast3M foi auxiliado pelo Ruby (Couto et al, 2013): software de interface para a execução da análise de encurvadura de modelos SAFIR. Este software cria ficheiros de entrada SAFIR, originando modelos com imperfeições geométricas. Só a partir deste último ficheiro é que é possível fazer a análise do modelo numérico.

Neste estudo, as opções definidas para o Ruby foram as seguintes: criar um ficheiro "input" (de entrada) SAFIR com imperfeições baseado nos modos e amplitudes definidas (dez modos neste caso, e as amplitudes variavam de secção para secção). Paralelamente o Ruby também cria ficheiros "output", ficheiros estes onde originava o primeiro modo de encurvadura global (ver Figura 4.2) e primeiro modo de encurvadura local (ver Figura 4.3).

Na Figura 4.2 está representado o primeiro modo de encurvadura global de uma secção de Classe 4, modo ao qual se retira o momento resistente M_{cr} do elemento. A amplitude aplicada é definido pelo Anexo C da EN 1993-1-5 (CEN, 2006b) que indica que, quando se analisa pelo MEF, é necessário aplicar 80% do valor das tolerâncias geométricas (defeitos de fabrico) recomendadas. Estas tolerâncias são definidas segundo o anexo D da EN 1090 (CEN, 2005d), considerando estas como tolerâncias essenciais. Para a situação de vigas sujeitas à flexão sem restrições (que é o caso), a tolerância usado toma o valor de $\frac{L}{750}$. Resultando assim a amplitude:

$$\Delta = 0.8 \left(\frac{L}{750} \right) = \left(\frac{L}{938} \right) \quad (4.1)$$

Todo este processo foi definido utilizando o software Ruby.

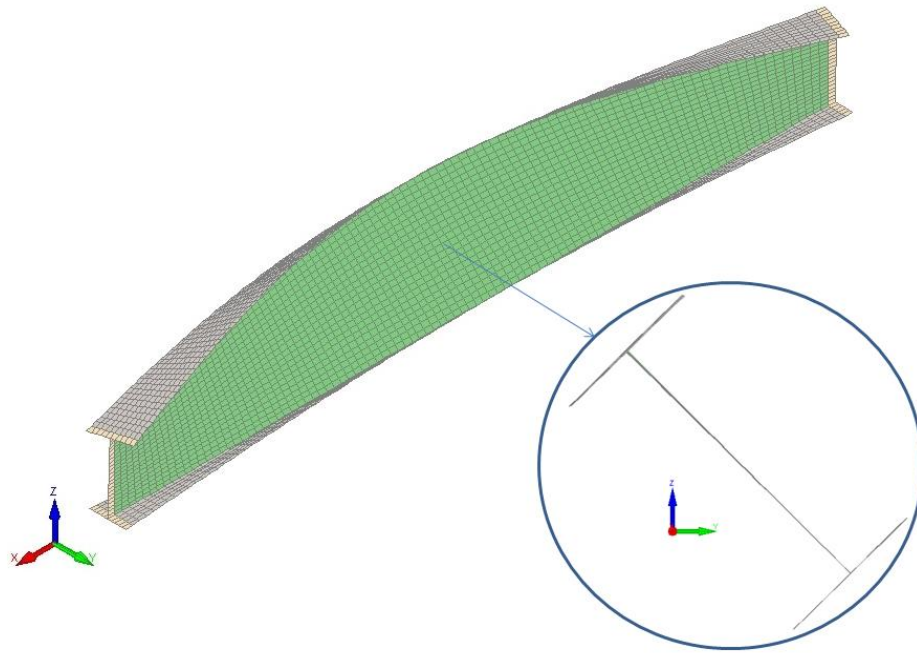


Figura 4.2 - Primeiro modo de encurvadura global da secção 516x5 255x8 com o vão de 5 metros

Em relação à Figura 4.3, o modo de encurvadura representado é o local. Neste modo, e como se pode observar no pormenor (secção ampliada), parte das secções do elemento são "forçadas" a rodar, fenómeno este que é representativo da encurvadura local. A amplitude deste modo é aplicado com a metodologia utilizada para a encurvadura lateral (usando a EN 1993-1-5 e a EN 1090), com a diferença dos valores definidos das tolerâncias geométricas (defeitos de fabrico) dos banzos e alma para secções soldadas: $\frac{b}{100}$. Resultando assim as amplitudes:

para os banzos

$$\Delta = 0.8 \frac{b}{100} \quad (4.2)$$

e para a alma

$$\Delta = 0.8 \frac{h_w}{100} \quad (4.3)$$

Sendo o b equivalente à largura do banzo e o h_w a altura da alma correspondente ao modelo numérico adotado.

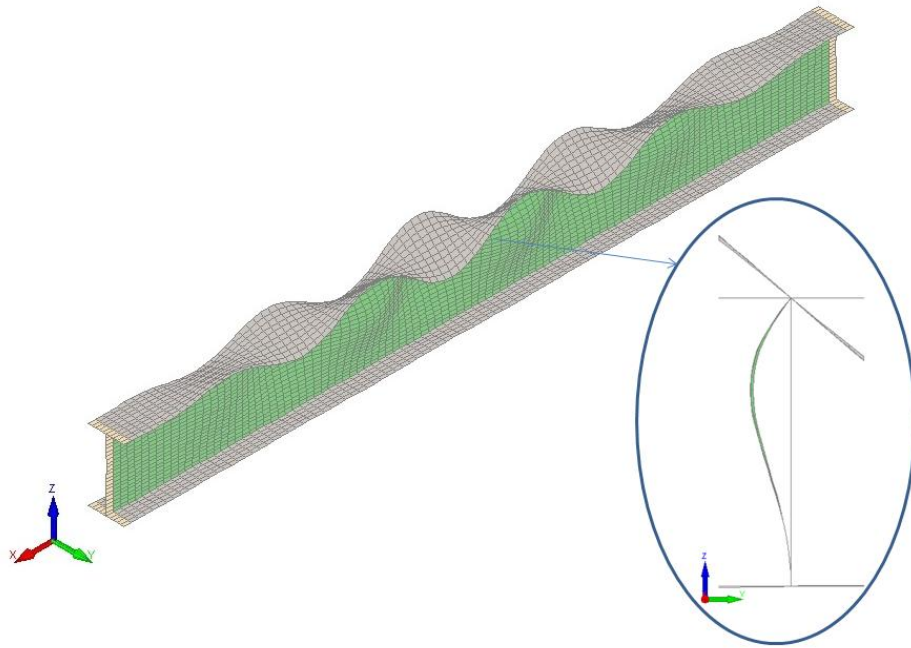


Figura 4.3 - Primeiro modo de encurvadura local da secção 516x5 255x8 com o vão de 5 metros

As tensões residuais adotadas são as típicas de aço carbono em secções soldadas, considerando constante em toda a espessura dos banzos e da alma, como mostrado na Figura 4.4 (Gardner, 2004). É possível reconhecer as tensões principais de tração e compressão, sendo estas as inseridas no modelo numérico.

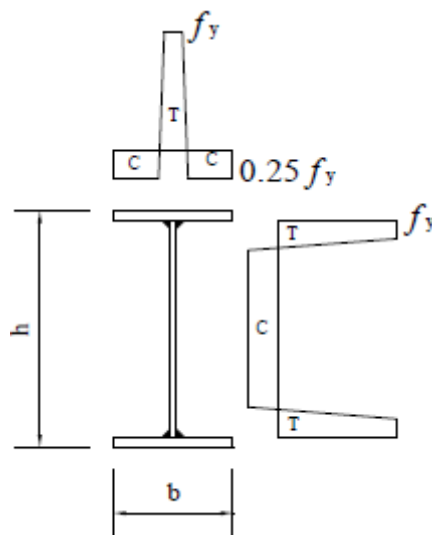


Figura 4.4 - Tensões residuais em I - perfis soldados (C - compressão, T - tração) (Gardner, 2004)

4.2. Casos de Estudo

Para os casos de estudo foram escolhidos três aços inoxidáveis por serem mais comuns e por apresentarem tensões de cedência e módulos de elasticidade diferentes entre eles: o aço austenítico 1.4301 (304), o aço ferrítico 1.4003 e o aço austenítico-ferrítico 1.4462 (2205). As vigas a estudar têm secções de Classe 4 com comprimentos de dois metros até vinte metros, de modo a que a esbelteza do elemento atingisse sempre o valor de dois. Optou-se, para uniformizar a construção dos vários elementos a modelar, por definir espessuras para o banzo e alma de oito e cinco milímetros respetivamente. A Tabela 4.1 mostra todos os casos que foram estudados, sendo que as secções têm uma nomenclatura do seguinte tipo: "Altura da secção"x"Espessura da alma" "Largura da secção"x"Espessura do banzo".

Tabela 4.1 - Casos de estudo para $\Psi = 1$

$\Psi=1$						
Secções	Classe					
	1.4301		1.4003		1.4462	
	Banzo	Alma	Banzo	Alma	Banzo	Alma
516x5 255x8	C4	C4	C4	C4	C4	C4
416x5 200x8	C4	C4	C4	C4	C4	C4
336x5 200x8	C4	C3	C4	C4	C4	C4
366x5 150x8	C3	C4	C4	C4	C4	C4
266x5 200x8	C4	C2	C4	C3	C4	C4
416x5 135x8	C2	C4	C3	C4	C4	C4
236x5 200x8	-	-	-	-	C4	C3
366x5 100x8	-	-	-	-	C3	C4
246x5 200x8	-	-	C4	C2	-	-
186x5 200x8	-	-	-	-	C4	C2
416x5 120x8	-	-	C2	C4	-	-
416x5 91x8	-	-	-	-	C2	C4

Tabela 4.2 - Casos de estudo para $\Psi = 0$

$\Psi=0$						
Secções	Classe					
	1.4301		1.4003		1.4462	
	Banzo	Alma	Banzo	Alma	Banzo	Alma
516x5 255x8	C4	C4	C4	C4	C4	C4

Tabela 4.3 - Casos de estudo para $\Psi = -1$

$\Psi=-1$						
Secções	Classe					
	1.4301		1.4003		1.4462	
	Banzo	Alma	Banzo	Alma	Banzo	Alma
516x5 255x8	C4	C4	C4	C4	C4	C4

4.3. Propriedades da secção

As secções dos modelos criados no SAFIR possuem pequenas diferenças comparadas com as secções reais. Nos modelos numéricos obtidos, pelo SAFIR, a secção é composta por elementos extremamente finos e no encontro destes possibilitar a existência de zonas críticas - ligação alma/banzo (ver Figura 4.5). Para simular as Classes das secções pretendidas (essencialmente as de Classe 4) foi necessário estabelecer uma relação entre a secção do modelo e a real: enquanto que a base das duas secções são iguais (correspondentes às linhas médias dos banzos), a altura do perfil no modelo corresponde à linha média da alma até ao encontro da linha média dos banzos, sendo a altura total real igual a esta mais a espessura do banzo.

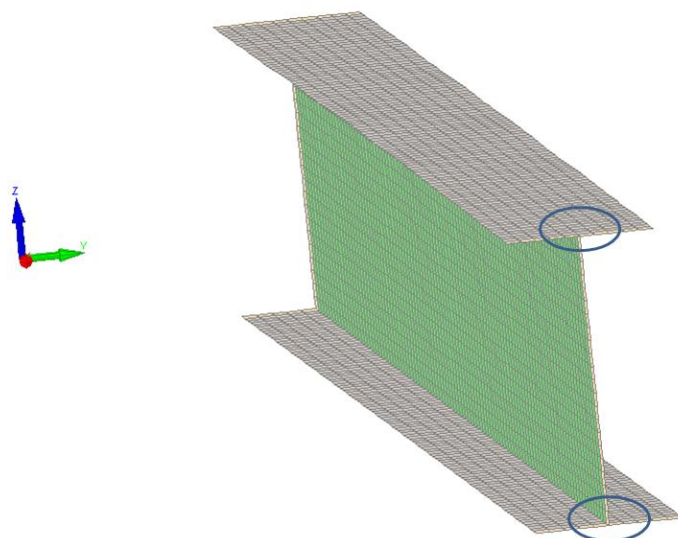


Figura 4.5 - Modelo numérico (zonas críticas)

Um dos aspetos importantes foi a dimensão da malha do modelo numérico. Esta foi utilizada para todos os comprimentos e secções, tendo a noção que quanto mais refinada for a malha mais precisos seriam os resultados. Uma das razões para não o fazer foi o número elevado de modelos existentes para serem simulados no SAFIR: quanto mais refinada fosse a malha, mais tempo demoraria e implicaria atrasos em relação ao planeamento do estudo. No sub-capítulo seguinte é explicado como foi realizado este refinamento.

4.4. Definição do modelo numérico

Na definição do modelo numérico, o refinamento da malha foi realizado com auxílio de uma folha de cálculo automática devido à existência de algumas variáveis: vãos e secções transversais (facilitando assim a processo da criação do modelo). A malha utilizada neste estudo tinha as seguintes características: 4343 nós, 4284 elementos; quanto à secção transversal, a alma tinha 22 elementos e cada um dos banzos 10 elementos; ao longo de todo o comprimento da viga existiam 100 elementos (ver Figura 4.6).

As restrições foram impostas nas extremidades de forma a reproduzir apoios em forquilha (elementos com travamento lateral nos apoios e simplesmente apoiados) (ver Figura 4.6). As restrições foram aplicadas no banzo inferior (direção vertical) e em toda

a linha da alma (horizontais) perpendicularmente ao eixo da viga (simulando assim o apoio em forquilha).

A aplicação das cargas também foi um aspeto fundamental a ter em conta de forma a produzir no elemento os efeitos desejados e a não provocar deslocamentos e rotações indesejadas, ou o impedimento das mesmas. Estas cargas foram aplicadas horizontalmente paralela ao eixo das vigas e nas duas extremidades para criarem um momento unitário positivo - $\Psi=1$. Mais tarde também foram usados elementos com momento unitário apenas numa das extremidades - $\Psi=0$ - e com momentos unitários simétricos nas extremidades - $\Psi=-1$ - de forma a estudar o tipo de carregamento nestes elementos.

Nas extremidades da viga existe secções constituída por elementos que foram adicionados (ver Figura 4.6, representado a amarelo), com o objetivo de evitar problemas numéricos localizados nessas zonas.

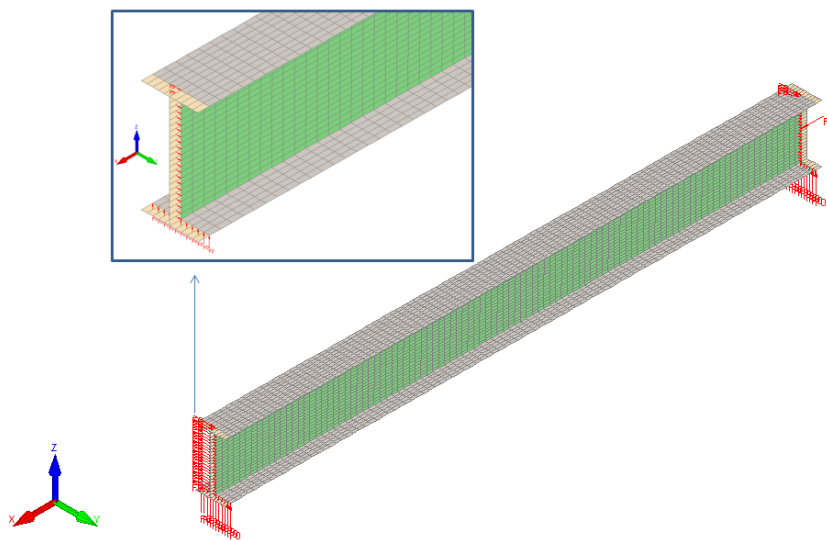


Figura 4.6 - Modelo numérico adotado (ao centro) com as condições de apoio (ampliado)

Os modelos foram ensaiados a temperaturas de 350°C, 500°C, 600°C e 700°C (elevadas temperaturas) utilizando uma distribuição de temperaturas igual em toda a secção, para facilitar a comparação com as curvas propostas assim como a do Eurocódigo 3.

A Figura 4.7 apresenta o instante de colapso de uma viga.

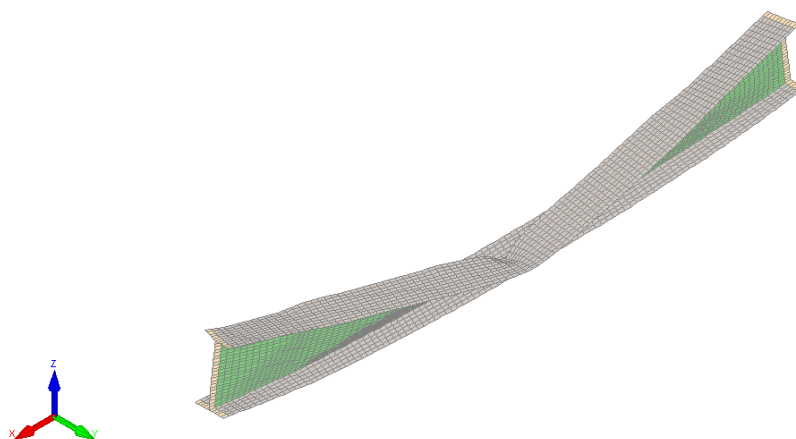


Figura 4.7 - Instante da ocorrência da carga última

Capítulo 5

Estudo Paramétrico

5 Estudo Paramétrico

5.1 Influência dos parâmetros

5.1.1 Influência do tipo de aço

5.1.2 Influência do tipo de secção

5.1.3 Influência do tipo de carregamento

5.2 Avaliação estatística

5. Estudo Paramétrico

Já com o modelo numérico definido, o passo seguinte seria comparar todas as propostas (Anexo Nacional Francês, Manual Euro Inox, Propostas da UA, Nova proposta), a metodologia utilizada pelo Eurocódigo 3 e os resultados obtidos pelo SAFIR entre si. Com esse objetivo, o método mais acessível seria a criação de gráficos (para todas as secções estudadas e todos os tipos de aço) em que as ordenadas são dadas pelos valores de $X_{LT,\theta}$ e as abscissas pelos valores da $\lambda_{LT,\theta,com}$.

Para o cálculo da esbelteza $\lambda_{LT,\theta,com}$, já mencionado anteriormente, é necessário as seguintes variáveis: o momento máximo ao qual a secção resiste para a temperatura considerada ($M_{c,rd}$) assim como o momento crítico elástico do elemento (M_{cr}) à mesma temperatura, sendo este último equivalente à resistência de uma viga se fosse analisado pelo cálculo elástico linear. Na prática, o cálculo do $M_{c,rd}$ é determinado deste modo: a viga considerada é restringida lateralmente (com um vão de três a cinco metros) colocando fixações na direção yy em todos os pontos médios do banzo superior; os apoios são em forquilha e são aplicados momentos unitários nos extremos (ou forças equivalentes a estes momentos). O elemento é testado para todas as temperaturas estipuladas e são retiradas as cargas últimas. Para o cálculo do M_{cr} é necessário, depois de aplicadas as imperfeições geométricas, consultar o modo de encurvadura lateral e retirar o valor do deslocamento para todos os vãos (sendo este o valor à qual o elemento resiste lateralmente a frio obtidos pelo Ruby+Cast3M). É necessário obter, para cada vão, todos estes valores às temperaturas a estudar (350°C, 500°C, 600°C e 700°C). Para isso é necessário seguir o seguinte procedimento a partir da equação da parte 1-2 do EC3:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{0,2p,\theta}}{k_{E,\theta}}} \quad (5.1)$$

sendo

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{M_{c,rd}}{M_{cr}}} \quad (5.2)$$

O $M_{c,rd}$ é determinado usando a viga restringida lateralmente e obtendo a carga última do elemento para cada uma das temperaturas, originando assim o $M_{c,rd,\theta}$.

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \sqrt{\frac{M_{c,rd,\theta}}{M_{cr}}} \sqrt{\frac{1}{k_{E,\theta}}} \quad (5.3)$$

Como

$$M_{cr,\theta} = M_{cr} k_{E,\theta} \quad (5.4)$$

em que $k_{E,\theta}$ é um fator de redução da temperatura considerada, logo:

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta} = \sqrt{\frac{M_{c,rd,\theta}}{M_{cr,\theta}}} \quad (5.5)$$

O cálculo do $X_{LT,\theta}$ referente aos resultados numéricos, é equivalente ao quociente entre a carga última obtida pelo SAFIR e o $M_{c,rd,\theta}$.

5.1. Influência dos parâmetros

Neste capítulo, as influências do tipo de aço, da secção transversal e do tipo de carregamento serão examinados e os resultados comparados com a formulação do Eurocódigo e com as restantes propostas.

5.1.1. Influência do tipo de aço

Para mostrar a influência do tipo de aço, a secção transversal escolhida foi de Classe 4 (nos banzos e na alma), 516x5+255x8, em que o elemento está sujeito a um diagrama de momentos uniforme ($\Psi=1$).

A Figura 5.1 representa as curvas de todas as propostas e resultados numéricos para o aço inoxidável da classe 1.4301. Os restantes dois gráficos, Figura 5.2 e Figura 5.3, correspondem aos da classe 1.4003 e 1.4462 respetivamente.

Este gráfico mostra que a EN 1993-1-2 encontra-se sempre do lado da segurança comparativamente com os resultados numéricos obtidos, apesar de ser demasiada conservativa. Em esbeltezas mais elevadas, os resultados numéricos aproximam-se dos valores do EC3. Nos restantes dois gráficos, representativos dos aços das classes 1.4003 e 1.4462, os resultados numéricos obtidos também se comportam com a mesma evolução, à excepção de alguns resultados a 700°C do aço 1.4003 se encontrarem inseguros.

Relativamente à proposta do Manual EuroInox, quase todos os resultados do SAFIR não estão do lado da segurança para o aço da classe 1.4301 (ver Figura 5.1). O gráfico do

aço 1.4003 (ver Figura 5.2).indica que os resultados numéricos a 350°C e 500°C estão do lado da segurança, ao contrário dos resultados com temperaturas mais elevadas (600°C e 700°C) em que não estão do lado da segurança comparativamente à proposta do EuroInox. Quanto ao aço da classe 1.4462, os resultados numéricos encontram-se quase todos seguros.

Para as temperaturas estudadas, todos os resultados numéricos obtidos situam-se bem acima da proposta da Universidade de Aveiro (UA), sendo esta a mais conservativa de todas.

A proposta referente ao Anexo Nacional Francês será a que melhor se assemelha aos resultados numéricos obtidos (excluindo a nova proposta). Apesar de existirem resultados tanto acima como abaixo da linha desta proposta, o facto é que os resultados "acompanham" a linha desta proposta para os 3 tipos de aço.

A nova proposta foi idealizada tendo em conta os resultados numéricos obtidos para os 3 aços, apesar de no aço da classe 1.4003 não conter todos os resultados numéricos em segurança (principalmente os referentes aos 600°C e 700°C).

Para finalizar, e depois de todos os resultados numéricos obtidos, observa-se que os valores do aço da classe 1.4003 (ferrítico) possuem algumas discrepâncias entre si. Isto é, os resultados numéricos para as 4 temperaturas analisadas diferem com intervalo maior entre si, comparativamente ao observado para os outros dois tipos de aço. De realçar que o mesmo acontece para quase todos os resultados obtidos no estudo realizado. Conclui-se que o comportamento deste aço difere um pouco comparativamente aos restantes dois aços analisados. O aço da classe 1.4462 (duplex) é o que apresenta maiores valores de resistência.

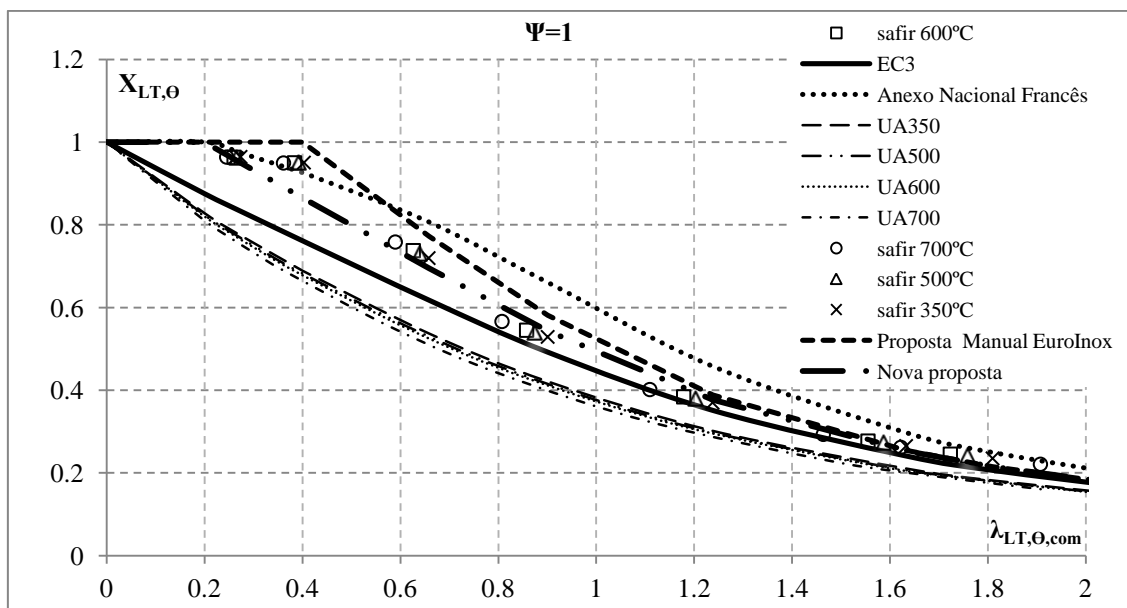


Figura 5.1 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301

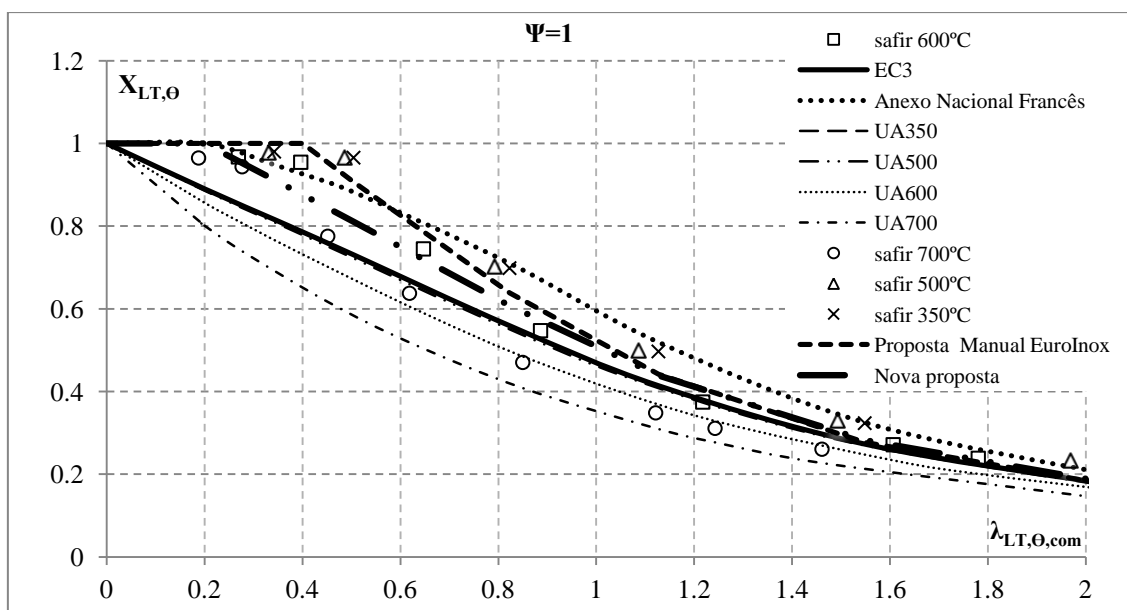


Figura 5.2 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4003

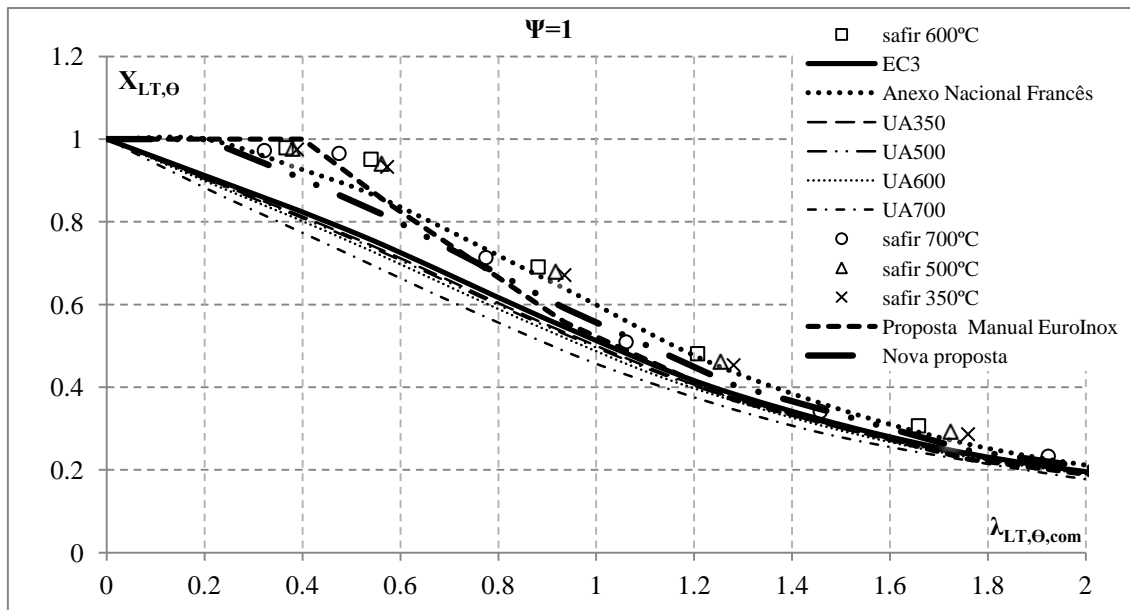


Figura 5.3 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4462

5.1.2. Influência da secção transversal

A esbelteza da secção transversal utilizada também foi um dos objetos de estudo. Essa influência foi estudada variando as Classes entre os banzos e as almas. De modo a que a secção transversal fosse sempre classificada como Classe 4 (definido no tema da dissertação), existiu sempre um dos elementos (alma ou banzo) que seria de Classe 4. Para isso foram aplicadas algumas combinações para as dimensões das secções: foram analisadas secções em que a alma é de Classe 4 e o banzo de Classe 3 (e vice-versa) assim como secções em que a alma é de Classe 4 e o banzo de Classe 2 (e vice-versa). Todas estas secções estavam sujeitas a um diagrama de momentos uniforme ($\Psi=1$) e estendem-se também aos três tipos de aço estudados (1.4301, 1.4003 e 1.4462).

Os gráficos apresentados a seguir pertencem ao aço inoxidável 1.4301, sendo que os restantes dois aços têm um semelhante comportamento relativamente a este.

O Eurocódigo 3 encontra-se em segurança segundo os resultados numéricos para estas secções, apesar de em esbeltezas menores estar bastante conservativo. Em esbeltezas elevadas, estes resultados aproximam-se dos valores do EC3. Constata-se ainda que quando a Classe da alma é 3 ou 2 (ver Figura 5.5 e Figura 5.6, respetivamente), em esbeltezas muito perto do valor 2 os resultados numéricos tendem a afastar-se para o lado conservativo. De realçar que quando os banzos possuem uma Classe inferior à 4

(ver Figura 5.7 e Figura 5.8), os resultados numéricos situam-se no lado seguro mas com maior aproximação ao EC3 comparativamente aos de Classe 4.

O Anexo Nacional Francês não se encontram do lado da segurança, quando as Classes tanto da alma como do banzo baixam, em comparação com os resultados obtidos pelo SAFIR.

Relativamente à Proposta do Manual EuroInox, constata-se que só existem resultados numéricos do lado de segurança, em esbeltezas elevadas e apenas quando a alma é de Classe 2 ou 3.

A proposta da UA é a mais conservativa de todas, constando-se que todos os resultados obtidos estão em segurança. Esta proposta indica a metodologia para Classes 1 e 2, logo a comparação destes resultados numéricos corrobora a referida proposta nomeadamente para o Figura 5.6 e Figura 5.8 (onde contêm elementos de Classe 2).

Quanto à nova proposta, conclui-se que é a mais próxima dos resultados obtidos, apesar de alguns destes não estarem do lado da segurança.

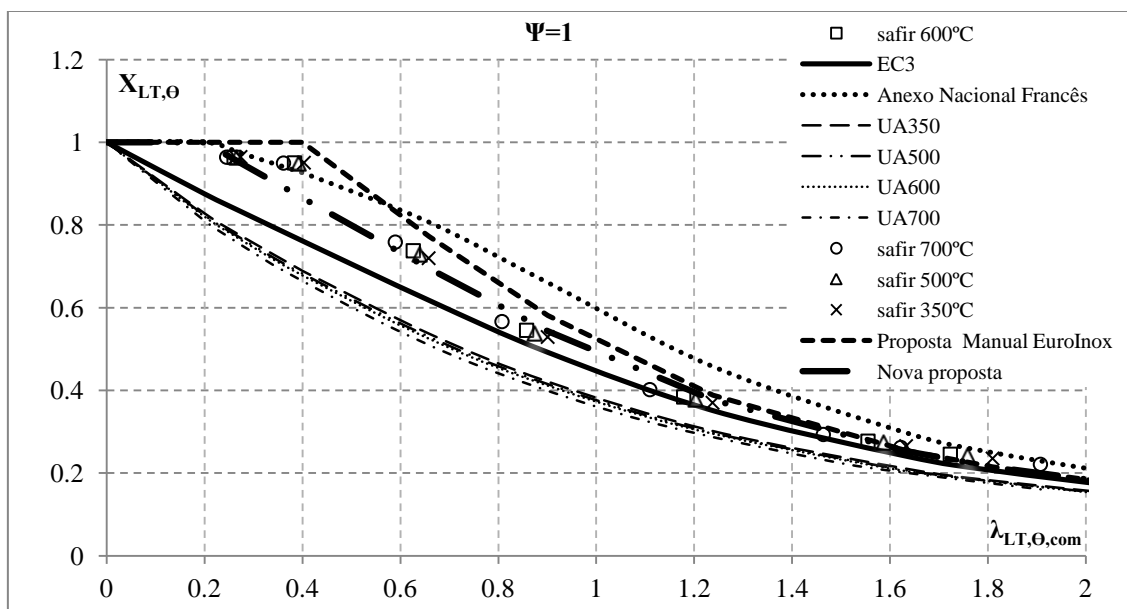


Figura 5.4 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma e banzo de Classe 4)

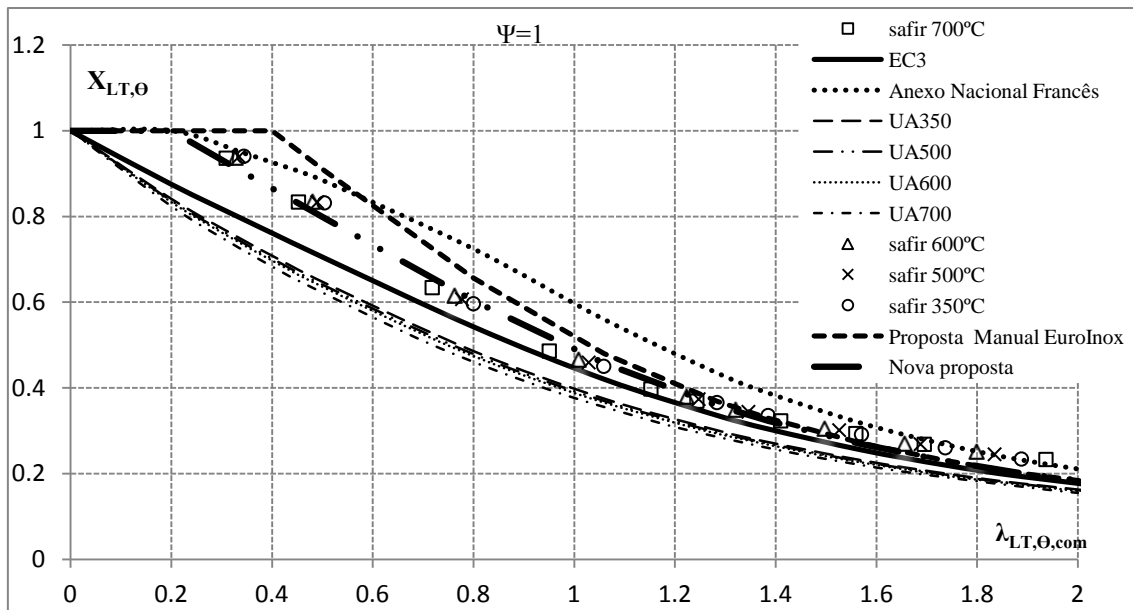


Figura 5.5 - Resultados numéricos para vigas 336x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 3 e banzo de Classe 4)

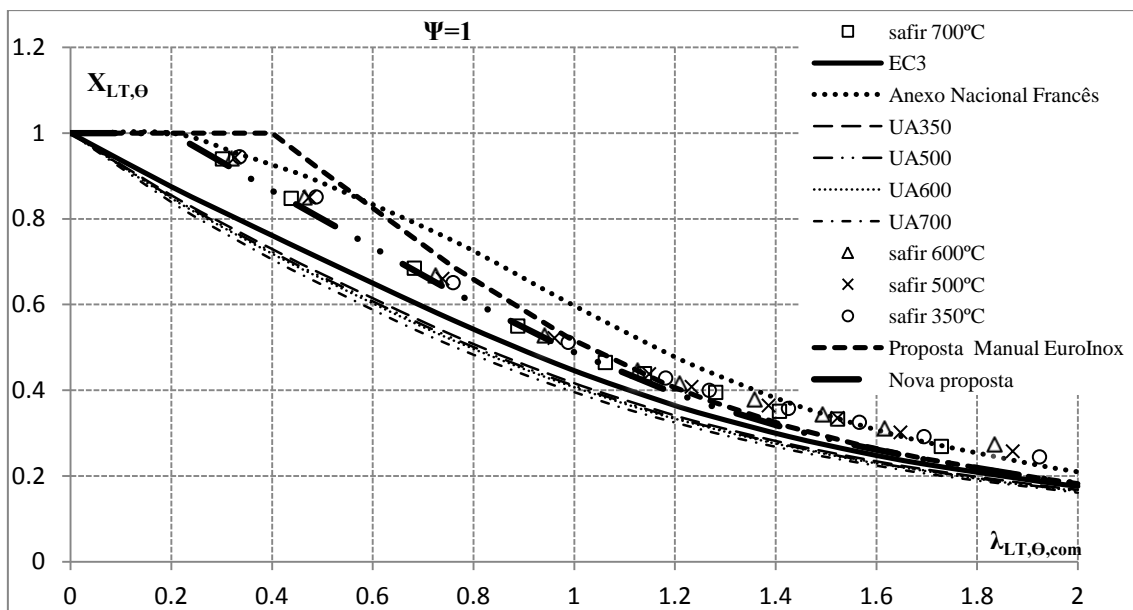


Figura 5.6 - Resultados numéricos para vigas 266x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 2 e banzo de Classe 4)

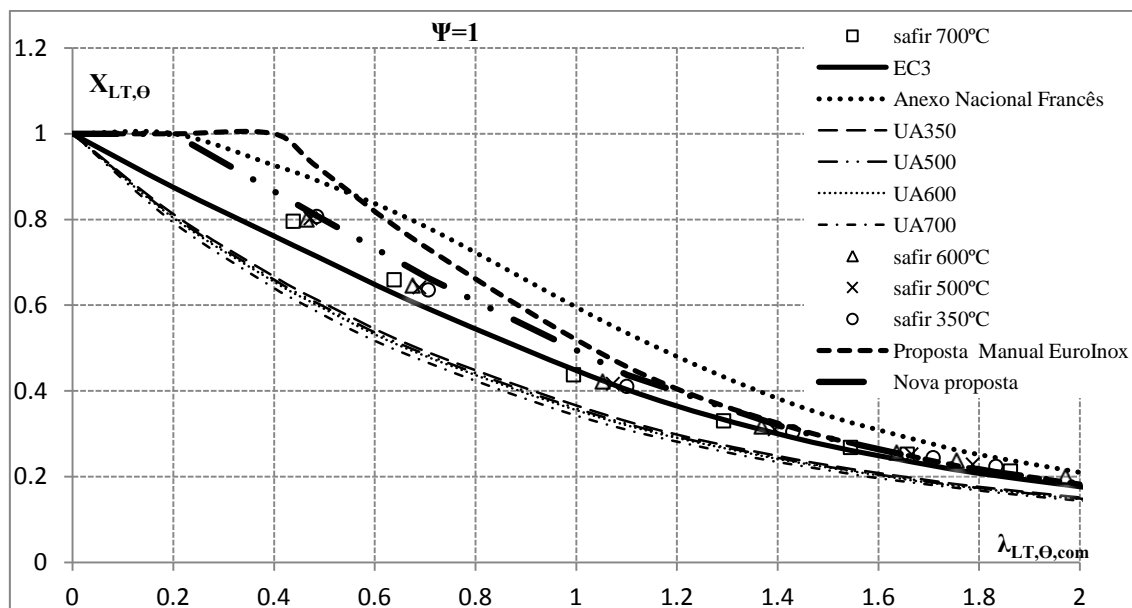


Figura 5.7 - Resultados numéricos para vigas 366x5 150x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 3)

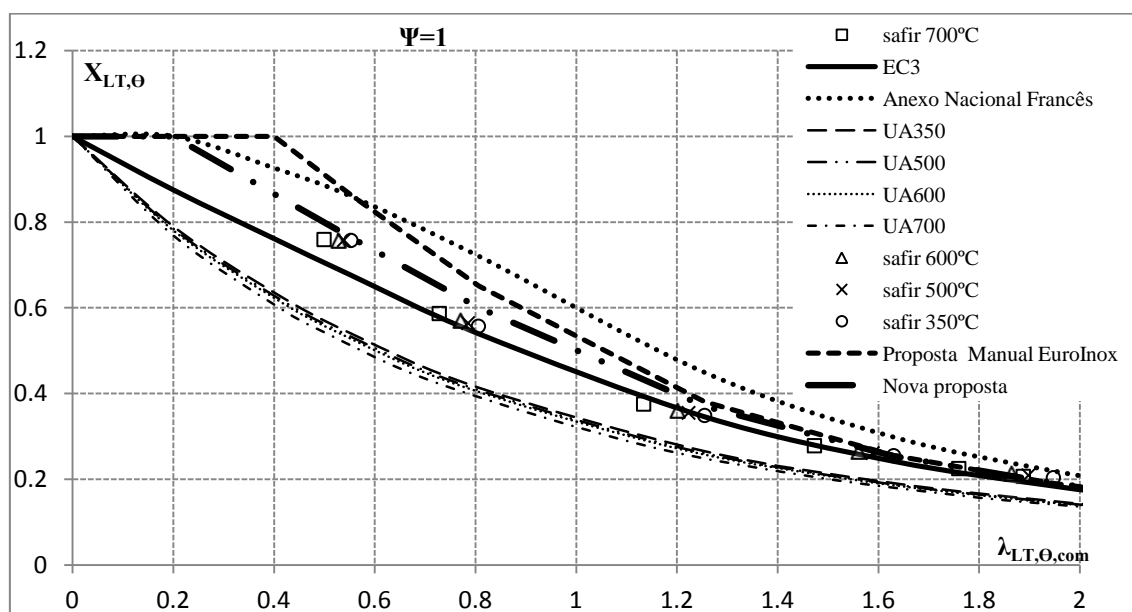


Figura 5.8 - Resultados numéricos para vigas 416x5 135x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 2)

5.1.3. Influência do tipo de carregamento

Por último foi analisado qual seria o comportamento dos elementos se fizesse variar o carregamento. Foram aplicados cargas, de modo a que resultasse diagramas de momentos com $\Psi=-1$ e $\Psi=0$ (equivalente a momentos unitários simétricos nos apoios e momento unitário num dos apoios, respetivamente).

Tabela 5.1 - Diagramas do momento fletor com o respetivo Ψ	
Ψ	Distribuição de momentos
1	
0	
-1	

Essa influência foi estudada só para uma secção: 516x5 255x8, sendo esta secção de Classe 4, e também para os três tipos de aço já mencionados anteriormente (1.4301, 1.4003 e 1.4462).

Os gráficos apresentados a seguir pertencem ao aço inoxidável 1.4301, sendo que os restantes dois aços têm um comportamento semelhante relativamente a este.

Na análise dos gráficos a seguir, estes referentes ao $\Psi=1$ (Figura 5.9), $\Psi=0$ (Figura 5.10) e $\Psi=-1$ (Figura 5.12), pode-se concluir que o caso mais desfavorável é o gráfico com o $\Psi=1$. Este foi um dos motivos ao qual, à partida, foi estudado para um número maior de secções com este fator de carregamento ($\Psi=1$) e não com outros fatores de carregamento ($\Psi=0$ e $\Psi=-1$), sendo que ao fazer um número maior de situações com $\Psi=1$ iria estar no caso mais desfavorável.

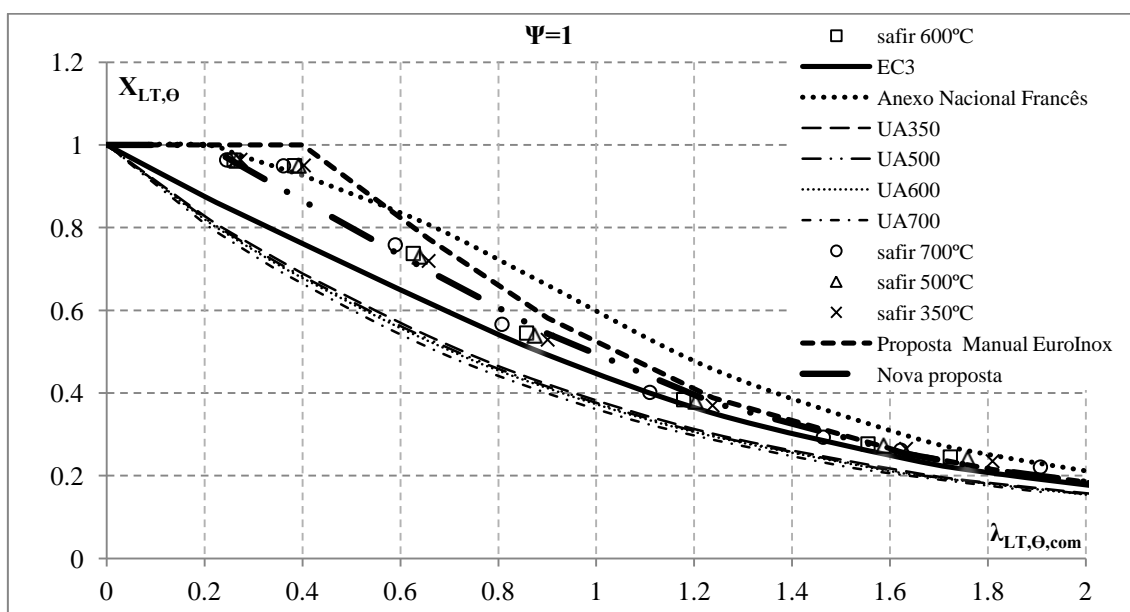


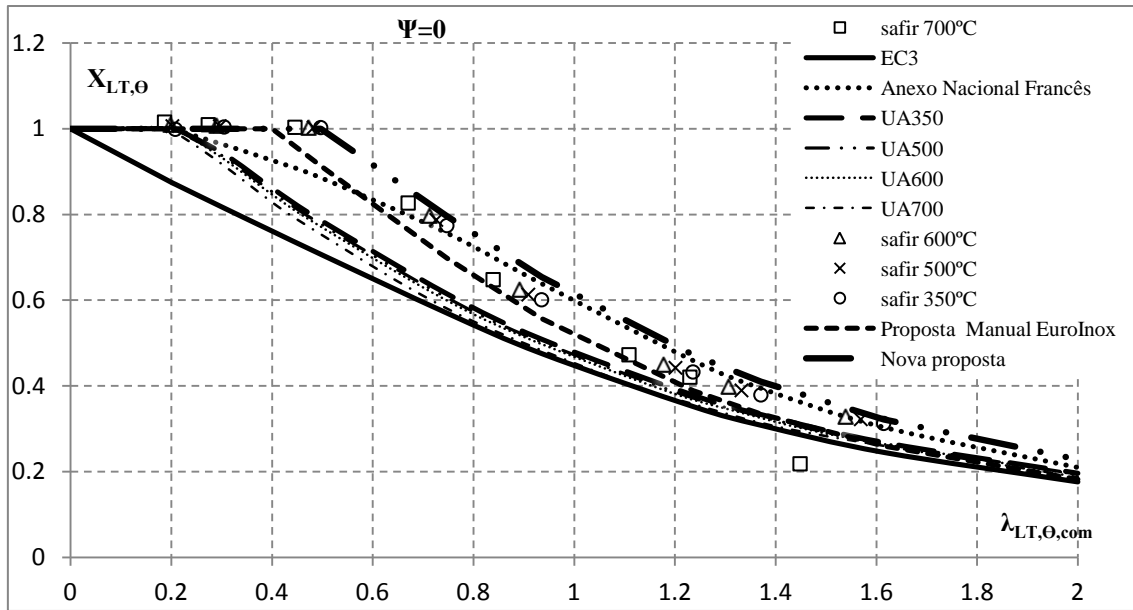
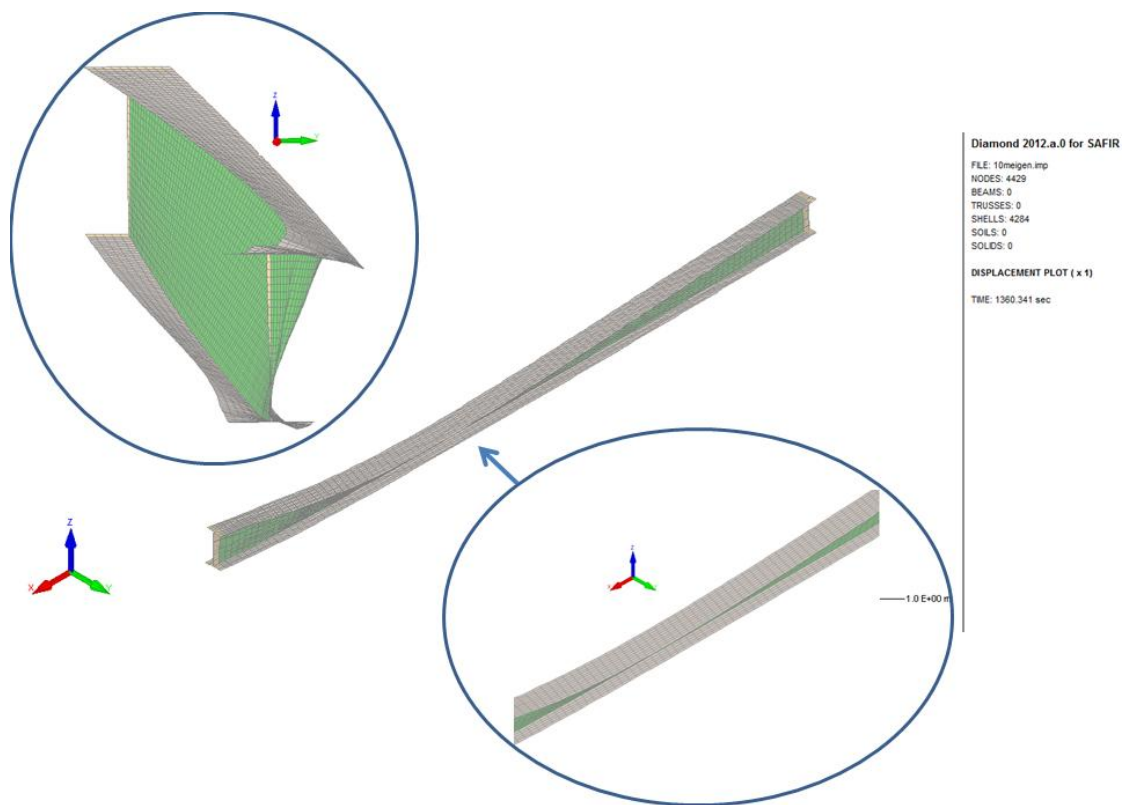
Figura 5.9 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 ($\Psi=1$)

De facto os resultados numéricos obtidos para $\Psi=0$ e $\Psi=-1$ indicam que, com estes fatores de carregamento, se encontram mais seguros do que para $\Psi=1$ principalmente em esbeltezas mais baixas. Praticamente todos estes resultados numéricos estão no lado da segurança, excepto quando comparados com o Anexo Nacional Francês, em que esbelteza a partir de sensivelmente do valor 0.8, se encontram num patamar não seguro (ver Figura 5.10 e Figura 5.12). De realçar que o Eurocódigo 3 é mais conservativa de todas as propostas apresentadas. Nestes últimos casos de carregamento observa-se que a nova proposta não está do lado da segurança, sendo mesmo a curva de cálculo mais insegura. Deve-se ao fato de conter no seu procedimento de cálculo a contabilização do fator f , segundo a propostas da UA.

Na Figura 5.10 observa-se um ponto (ponto este que pertence aos 700°C dos resultados numéricos) que está totalmmente fora do seguimento dos restantes resultados, e estando fora da segurança. Analisando mais concretamente o ponto, verificou-se que o deslocamento máximo atingido, no instante da carga última, no ponto mais desfavorável do elemento (tendo um vão de 20 metros) foi de 0,018 metros (cerca de 2 centímetros). Para um vão desta proporção, o deslocamento deveria ter um valor mais elevado.

Na Figura 5.11 e Figura 5.13 estão representadas as deformadas para $\Psi=0$ e $\Psi=-1$, respetivamente, no instante da carga última. Observa-se claramente, nas imagens ampliadas, que as deformadas dos elementos diferem quando o fator de carregamento é com $\Psi=1$ (ver Figura 4.7).

Toda a análise realizada até este ponto só é válida a partir de esbeltezas com o valor de 0.4 para a frente. Pois existem resultados numéricos abaixo deste valor que encontram-se inseguros e, principalmente, não correspondem ao objetivo do estudo realizado até aqui: estudar o momento resistente à encurvadura lateral de um elemento sem travamento lateral. Logo, é necessário que os elementos cheguem à carga última à flexão. A explicação para estes resultados (vigas com esbeltezas pequenas, que correspondem a vãos pequenos) é a seguinte: com os momentos criados nestas situações em que o $\Psi=0$ e $\Psi=-1$, originam reações ao esforço transversal nos apoios. Logo nestes casos, a rotura do elemento dá-se devido à encurvadura por esforço transversal a que os elementos se encontram sujeitos e não devido ao momento fletor.


 Figura 5.10 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 ($\Psi=0$)

 Figura 5.11 - Instante da carga última para a viga 516x5 255x8 de aço inoxidável 1.4301 com 10 metros de vão a 350°C ($\Psi=0$)

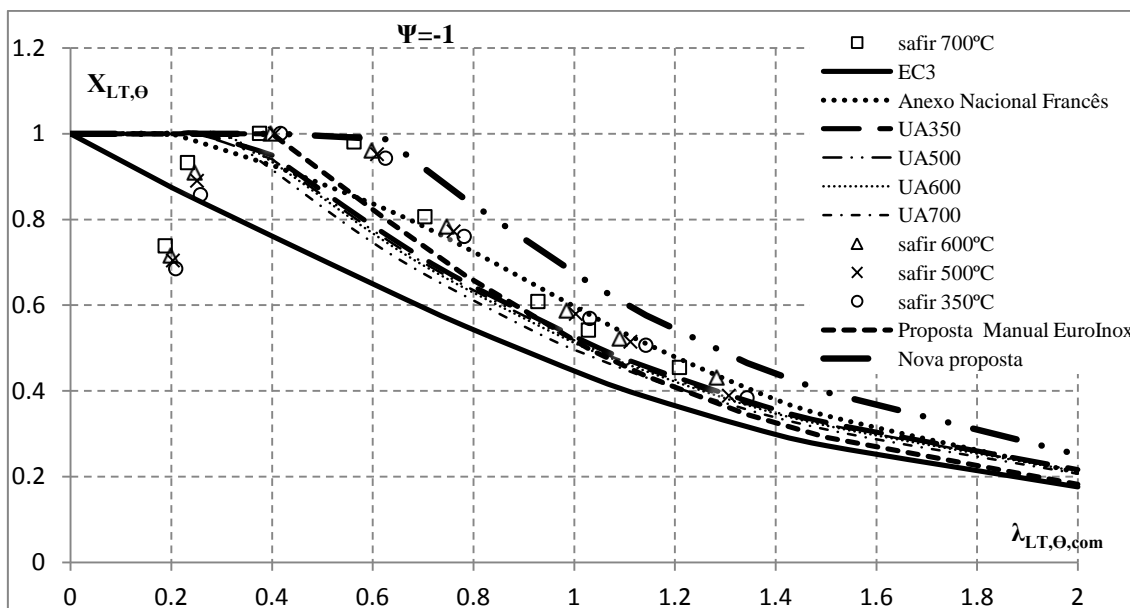


Figura 5.12 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 ($\Psi=-1$)

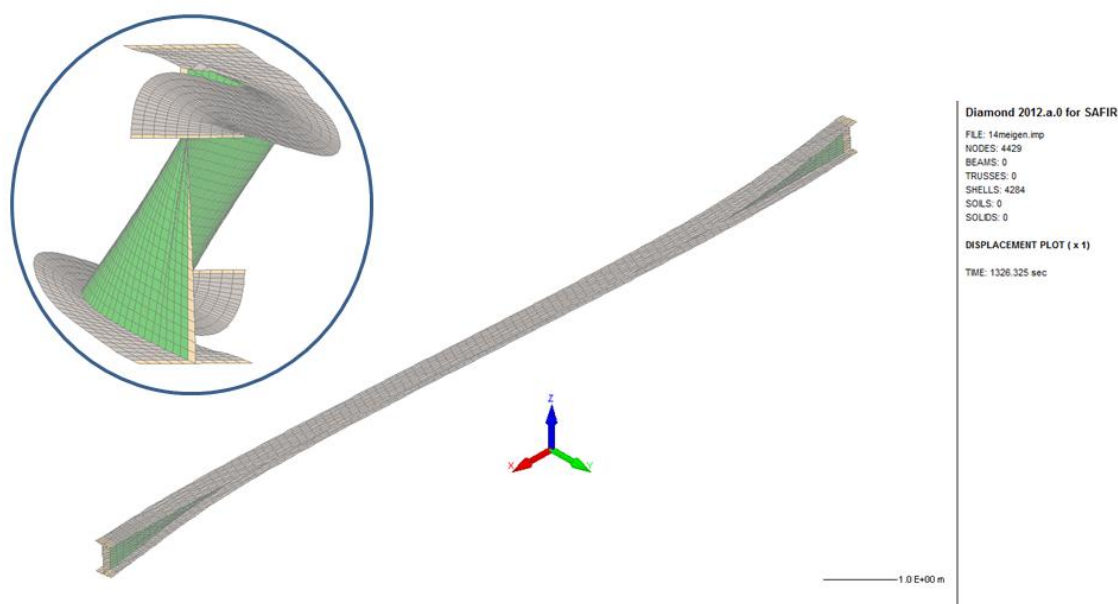


Figura 5.13 - Instante da carga última para a viga 516x5 255x8 de aço inoxidável 1.4301 com 14 metros de vão a 350°C 14 metros ($\Psi=-1$)

5.2. Avaliação estatística

De modo a avaliar a veracidade do estudo numérico obtido, foi realizado uma avaliação estatística comparando os resultados numéricos do SAFIR com todas as propostas enunciadas anteriormente. Na elaboração dos gráficos foi determinado o quociente entre a proposta a ser comparada e o resultado numérico correspondente para a mesma

secção, temperatura, tipo de aço e vão. A linha auxiliar representada nos gráficos corresponde ao limite de segurança entre a proposta a estudar e os resultados numéricos. As restantes 2 linhas a tracejado correspondem a 10% deste último limite, tanto inferior como superior, sendo que são meramente linhas de referência e estão representadas apenas para uma melhor abordagem na visualização dos gráficos

Na Tabela 5.2 é apresentado mais alguns parâmetros que foram determinados para o tratamento estatístico de todas as propostas analisadas, para uma melhor compreensão dos resultados numéricos obtidos. Parâmetros estes que são: o número de amostras, a média, o desvio padrão e amostras fora da segurança relativamente aos resultados do SAFIR.

Tabela 5.2 - Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos

	Eurocódigo 3	A. N. Francês	P. M. EuroInox	Proposta UA	Nova proposta
Número de amostras	912	912	912	912	912
Média	0.87	1.01	0.92	0.80	0.89
Desvio padrão	0.19	0.25	0.22	0.18	0.22
Amostras fora da segurança	130 (14%)	479 (53%)	308 (34%)	60 (7%)	202 (22%)

Tabela 5.3 - Avaliação estatística referente à comparação entre as propostas analisadas e os resultados numéricos (aço 1.4301)

	Eurocódigo 3	A. N. Francês	P. M. EuroInox	Proposta UA	Nova proposta
Número de amostras	180	180	180	180	180
Média	0.88	1.11	1.03	0.77	0.97
Desvio padrão	0.06	0.11	0.11	0.04	0.08
Amostras fora da segurança	5 (3%)	152 (84%)	103 (57%)	0 (0%)	54 (30%)

Seguidamente é apresentado a Figura 5.14, este correspondente aos resultados obtidos entre o EC3 e os numéricos. A maioria dos resultados numéricos encontram-se em segurança (os pontos situam-se abaixo da linha de referência), sendo que o desvio padrão obtido é algo elevado (consultar a Tabela 5.2). De referir que a média está

abaixo de um, portanto é o pretendido (está seguro) e 14% das amostras encontram-se fora da segurança.

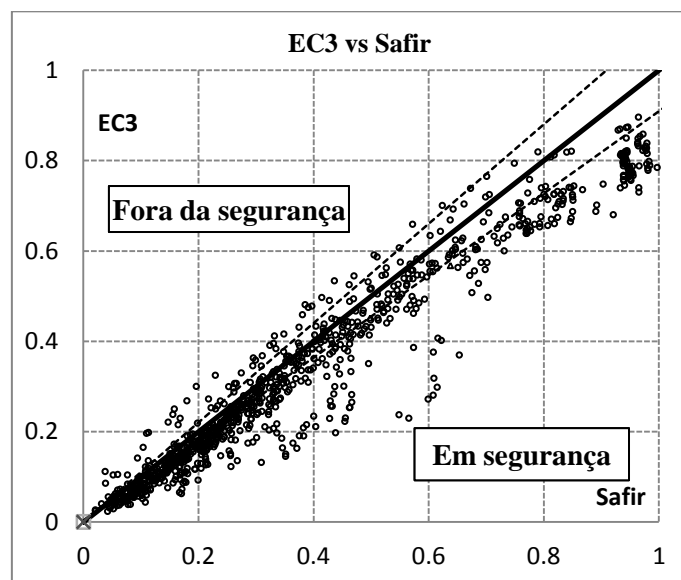


Figura 5.14 - Comparação estatística entre o Eurocódigo 3 e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis

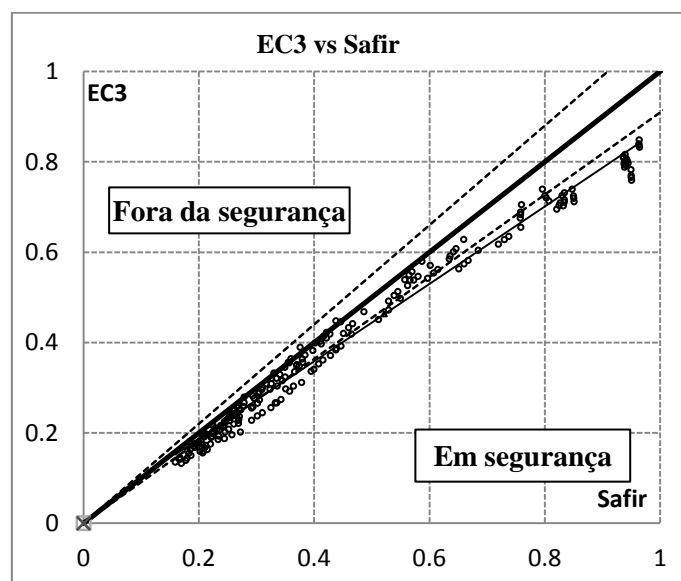


Figura 5.15 - Comparação estatística entre o Eurocódigo 3 e os resultados numéricos para a classe 1.4301

Na Figura 5.16 é apresentado os 912 resultados (amostras) referentes ao Anexo Nacional Francês em comparação com os resultados numéricos, notando-se claramente que muitos se encontram fora da segurança (53% dos resultados). Apesar deste facto, a média é muito próxima de 1 (1,01) sendo que o desvio padrão se reflete com um valor bastante elevado (0.25). De realçar que, de todas as propostas analisadas do ponto de vista estatístico, esta é a que possui um desvio padrão maior e é a única que a média se encontra fora da segurança (é maior que 1, apesar de estar muito próximo).

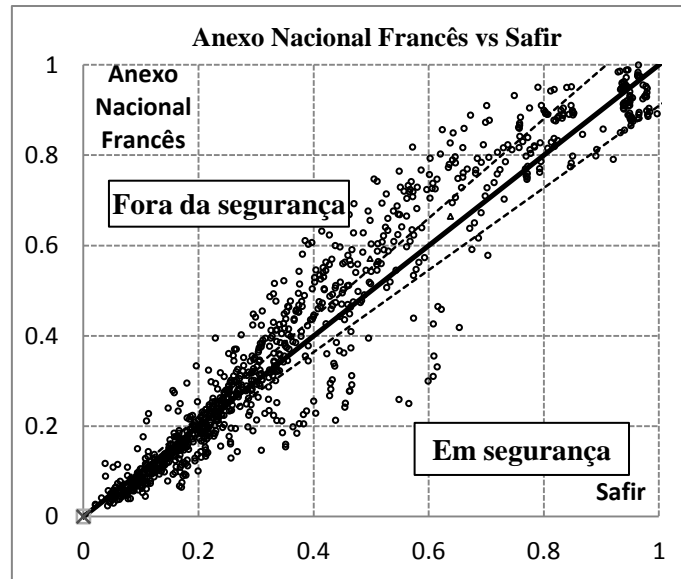


Figura 5.16 - Comparação estatística entre o Anexo Nacional Francês e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis

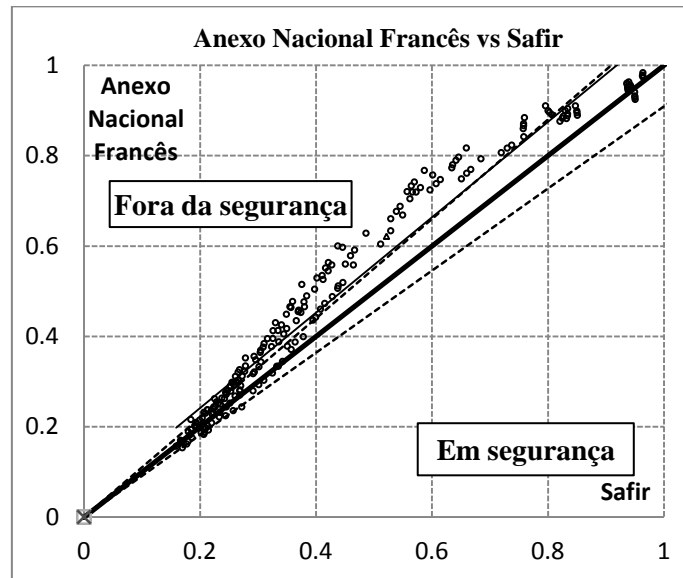


Figura 5.17 - Comparação estatística entre o Anexo Nacional Francês e os resultados numéricos para a classe 1.4301

Seguidamente é apresentado a Figura 5.18, que corresponde aos resultados obtidos entre a proposta do Manual EuroInox e os numéricos. 34% dos resultados obtidos da proposta estão fora da segurança (das 912 amostras), resultando numa média de 0.92 (menor que 1, logo em segurança) e um desvio padrão de 0.22.

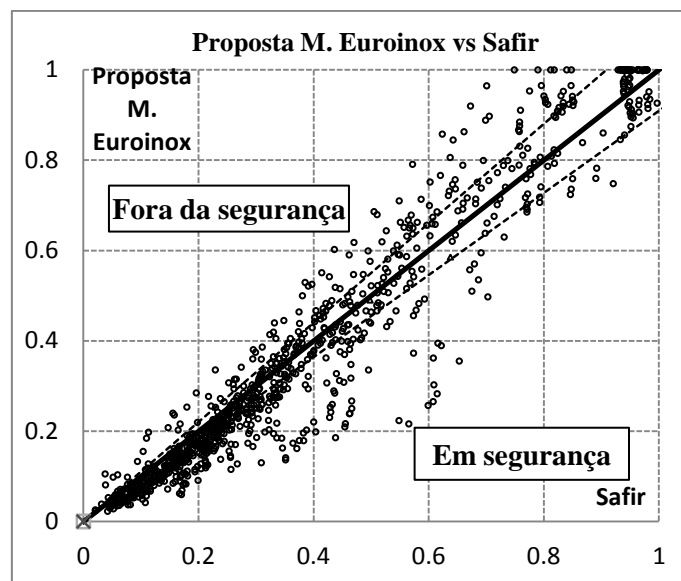


Figura 5.18 Comparação estatística entre a proposta do Manual EuroInox e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis

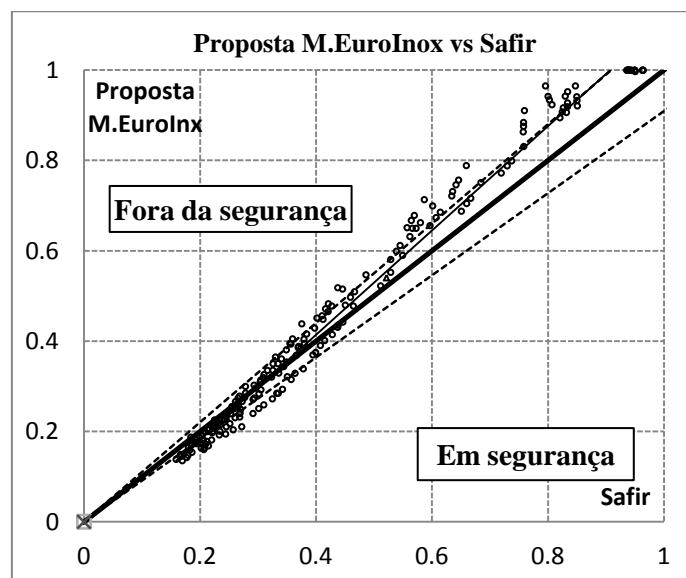


Figura 5.19 - Comparação estatística entre a proposta do Manual EuroInox e os resultados numéricos para a classe 1.4301

A Figura 5.20 refere-se à comparação entre os resultados da proposta da UA e os resultados do SAFIR. De todas as propostas analisadas, esta foi a que obteve resultados, do ponto de vista estatístico, mais positivos. A média obtida foi de 0.80, sendo a mais conservativa de todas; o desvio padrão também possui um valor baixo e o menor de entre todas as propostas (0.18); o mesmo se observa com o número de resultados fora de segurança, sendo de apenas 7% (60 das 912 amostras).

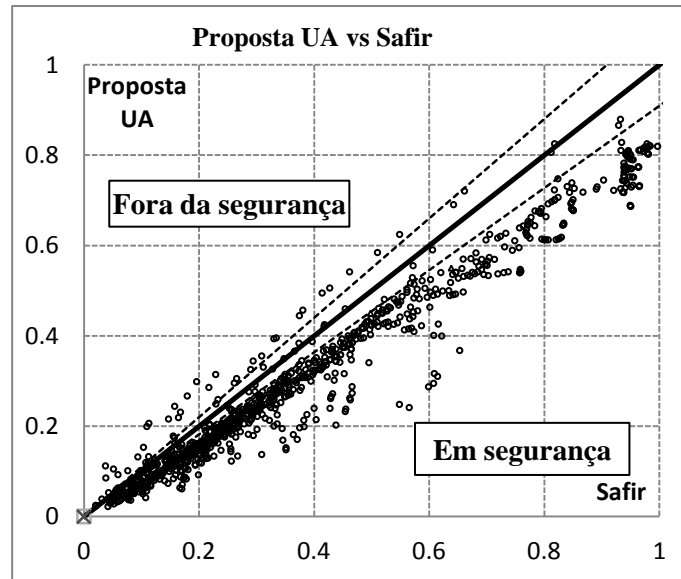


Figura 5.20 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis

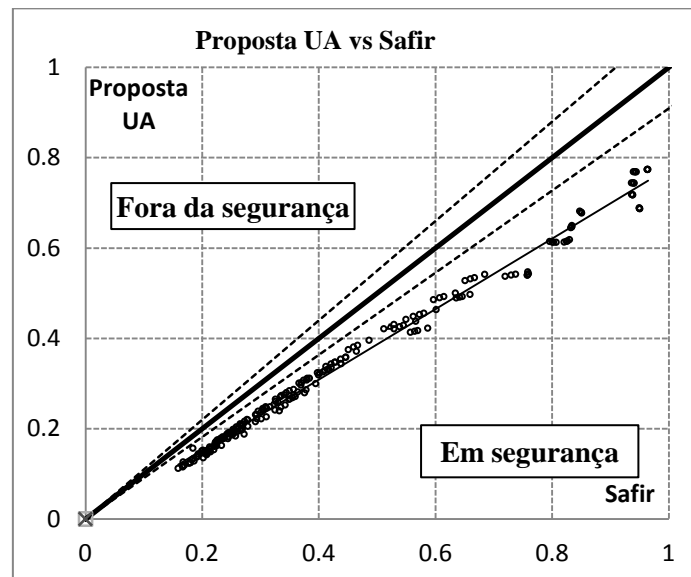


Figura 5.21 - Comparação estatística entre a proposta da UA e os resultados numéricos para a classe 1.4301

Para finalizar é apresentado a Figura 5.22 onde se comparam os resultados numéricos obtidos com a nova proposta. Apesar de ter sido a proposta sugerida para a validação dos resultados numéricos, neste tratamento de dados estatísticos não foi a propostas que obteve os melhores resultados. A média (0,89), apesar de estar segura, e o seu desvio padrão (0.22) tornam a validação com uma incerteza associada. Existe também uma percentagem algo considerável de amostras fora da segurança (22%).

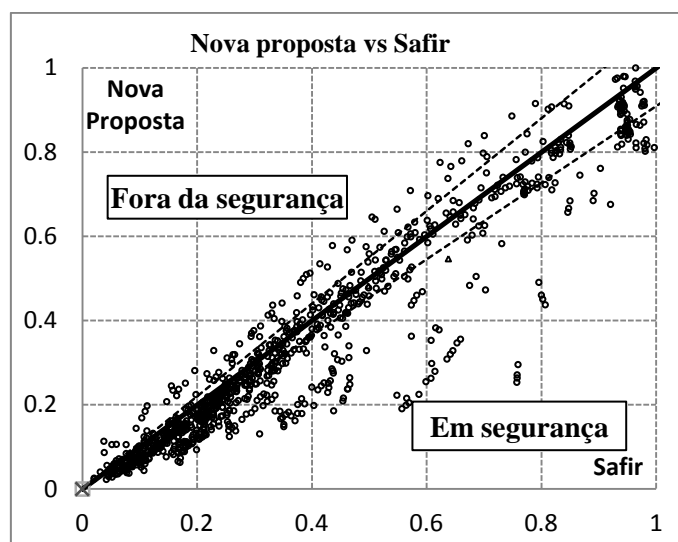


Figura 5.22 - Comparação estatística entre a nova proposta e os resultados numéricos para todas as classes dos aços inoxidáveis

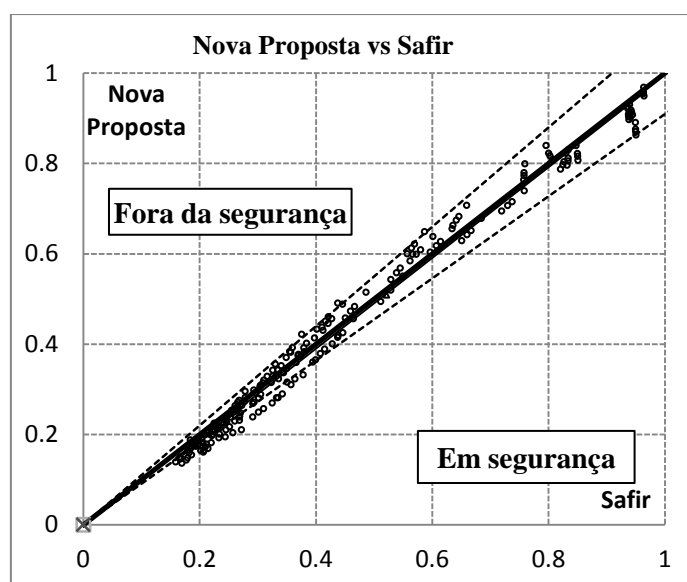


Figura 5.23 - Comparação estatística entre a nova proposta e os resultados numéricos para a classe 1.4301

Capítulo 6

Considerações finais

6 Considerações finais

6.1 Conclusões gerais

6.2 Desenvolvimentos futuros

6. Considerações finais

6.1. Conclusões gerais

Este capítulo finaliza a dissertação através de uma análise ao trabalho desenvolvido e a alusão a vários pontos importantes a reter do mesmo.

A presente dissertação teve como principal objetivo aprofundar o conhecimento do comportamento de vigas de aço inox com secções em I de Classe 4 a altas temperaturas. Através de modelos numéricos apresentou-se a verificação do momento resistente de vigas à encurvadura lateral sem travamento lateral assim como a validação destes mesmos modelos.

Na modelação numérica foram apresentadas breves descrições dos dois softwares utilizados (SAFIR e Cast3M+Ruby), foram apresentados os casos de estudos, definida a secção utilizada no modelo numérico assim como a descrição do próprio modelo.

Seguidamente apresentaram-se os resultados numéricos obtidos fazendo a comparação com as propostas definidas, onde foi ainda explicada e debatida a influência de três parâmetros: tipo de aço, tipo de secção e tipo de carregamento. Para finalizar fez-se uma breve avaliação estatística dos resultados numéricos.

Obtidos os resultados numéricos e o tratamento dos mesmos foi possível chegar a algumas conclusões dividindo-os na influência de três parâmetros já predefinidos:

- a) Tipo de aço: o Eurocódigo 3 encontra-se no lado da segurança, embora demasiado conservativo; a curva de cálculo da nova proposta é a mais adequada de entre todas as propostas; o ferrítico é o que dá mais problemas, pois os resultados obtidos têm grande discrepância de valores entre as 4 temperaturas estudadas; o duplex é o aço (dos três) que apresenta maiores valores de resistência.
- b) Tipo de secção transversal: o Eurocódigo 3 está no lado da segurança; a curva de cálculo da nova proposta é a mais semelhante aos resultados numéricos de entre todas as propostas; a proposta da UA é a mais conservativa.
- c) Tipo de carregamento: aqui aparece o fenómeno de encurvadura por esforço transversal (em esbeltezas pequenas), onde alguns dos elementos atingem a

carga última devido aos esforço transverso e não devido ao momento fletor; o Anexo Nacional Francês não se encontra do lado da segurança apenas para alguns resultados numéricos, sendo que a nova proposta, para $\Psi=-1$ e $\Psi=0$ está fora da segurança .

Em suma, a nova proposta surgiu com origem dos resultados numéricos realizados, servindo apenas para uma primeira abordagem à análise destes. Conclui-se que, devido às observações realizadas na influência do carregamento, será viável retirar a parte do fator f nesta nova proposta para futura validação da mesma.

Por fim, procedeu-se a uma avaliação estatística de todas as propostas analisadas com os resultados numéricos obtidos. Observou-se que a proposta com menor média (a mais segura) foi a da UA, assim como foi a que teve um desvio padrão menor e ainda o número de amostras fora de segurança mais baixo (7%). O Anexo Nacional Francês foi a proposta que teve maior número de amostras fora da segurança (>50%) assim como a média menos segura comparada aos resultados numéricos (1.01).

6.2. Desenvolvimentos futuros

Após a análise ao trabalho efetuado na presente dissertação, alguns pontos revelaram ser importantes para a evolução dos conhecimentos sobre elementos de aço inoxidável a altas temperaturas.

Todos os resultados numéricos realizados neste trabalho, para vigas em I de aço inoxidável de Classe 4, foram realizados para três classes de aço (1.4301, 1.4003 e 1.4462). O estudo deverá se estender para mais classes de aço, por exemplo para os aços 1.4571 e 1.4401.

Nesta tese foi abordada apenas as vigas submetidas à flexão. No entanto, o estudo poderá ser alargado combinando também momento com esforço axial (flexão composta). Para permitir um conhecimento mais aprofundado deste estudo será necessário analisar também para secções de Classe 3 (secções de resistência elástica).

As condições de apoio do estudo realizado foram todos em forquilha. Apoios encastrados ou mesmo elementos em consola deverão ser analisados futuramente. Em

vez de só existir momentos aplicados nas extremidades, poder-se-á estudar a influência de aplicar só carga uniformemente distribuída ou mesmo carga pontual a meio vão da viga.

Por fim, devem ser desenvolvidos estudos experimentais, com vista a comparar esses resultados com a nova proposta obtida deste estudo realizado assim como as metodologias do Eurocódigo e das restantes propostas analisadas.

Referências bibliográficas

Referências bibliográficas

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005a). “*EN 1993–1–1, Eurocode : Design of Steel Structures – Part 1–1: General rules and rules for buildings*”, Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005b). “*EN 1993–1–2, Eurocode : Design of Steel Structures – Part 1–2: General rules and rules for buildings*”, Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005c). “*EN 10088-2, Stainless steels – Part 2: Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes*”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2005d). “*EN 1090-2, Execution of Steel and aluminium Structures - Part 2: Technical Requirements for the execution of steel structures*”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2006a). “*EN 1993-1-4, Eurocode 3 : Design of steel structures – Part 1-4: General rules – Supplementary Rules for Stainless steels*”. Bruxelas, Bélgica.

CEN, Comité Europeu De Normalização (2006b). “*EN 1993–1–5, Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1–5: Plated structural elements*”. Bruxelas, Bélgica.

Chen, J.; Young, B. (2006). “*Stress–strain curves for stainless steel at elevated temperatures*”, Engineering Structures. Vol. 28, nº2, p. 229-239.

Couto, C; Vila Real, P. M. M.; Lopes, N. (2013). “*RUBY an interface software for running a buckling analysis of SAFIR models using Cast3M*”. Universidade Aveiro

Couto, C.; Vila Real, P. M. M.; Lopes, N.; Zhao, B (2013). “*Novas expressões para o cálculo da secção efectiva de secções transversais metálicas de Classe 4 a altas temperaturas*”. IX Congresso de Construção Metálica e Mista, Porto.

Ervedal, R. L. S. (2011). “*Resistência ao fogo de elementos estruturais metálicos de classe 4.*” Universidade de Aveiro. Dissertação de Mestrado.

ESDEP (2000). *“Programa Europeo de Formación en el Cálculo y Diseño de la Construcción en Acero”*. Espanha: Instituto Técnico de la Estructura en Acero (IETA).

Estrada, I.; Real, E.; Mirambell, E. (2007). *“General behaviour and effect of rigid and non-rigid end post in stainless steel plate girders loaded in shear. Part I: Experimental study”*. Journal of Constructional Steel Research. Vol 63, nº 7, p. 970-984.

EuroInox (2000). Disponível em < <http://www.euro-inox.org/>>. *“European Stainless Steel Development Association”*

EuroInox. (2006). *“Design Manual for Structural Stainless Steel”*. Steel Construction Institute, 3ªEdição.

Frassen, J. M. (2005). *“SAFIR: A thermal/structural program for modelling structures under fire”*. Engineering Journal- American Institute of Steel Construction Inc. Vol 42, nº3.

Franssen, J. M. (2007). *“User’s manual for SAFIR 2007a, a computer program for analysis of structures subjected to fire”*: Department ArGENCO. University of Liège.

Gardner, L. (2004). *“Numerical Modeling of Stainless Steel Structural Components – A consistent Approach”*. Journal of Constructional Engineering, ASCE. P 1586–1601.

Gardner, L. (2005). *“The use of stainless steel in structures”*. Progress in Structural Engineering and Materials. Vol 7, nº 2, p. 45-55.

Gardner, L.; Insausti, A.; Ng, K.; Ashraf, M. (2010). *“Elevated temperature material properties of stainless steel alloys”*. Journal of Constructional Steel Research. Vol 66, nº 5, p.634-647

Hricák, J.; Jandera, M.; Wald, F. (2014). *“Local buckling of Class 4 sections at elevated temperature”*. Benchmark studies - Experimental validation of numerical models in fire engineering.

Knobloch, M.; Fontana, M. (2006). *“Strain-based approach to local buckling of steel sections subjected to fire”*. Journal of Constructional Steel Research. Vol 62, nº 1, p. 44-67.

- Le Fichoux, E. (1998). *“Présentation et utilisation de CASTEM 2000”*. ENSTA-LME.
- Lopes, N.; Vila Real, P. M. M. (2011). *“Resistência de elementos estruturais em aço inoxidável à temperatura normal utilizando as leis constitutivas da parte 1.2 e 1.4 do ec3: estudo comparativo”*. Congress on Numerical Methods in Engineering.
- Lopes, N.; Vila Real, P.M.M. (2014) *“Class 4 stainless steel I beams subjected to fire”*, Thin Walled Structures, ISSN: 0263-8231, Elsevier, volume 83, pp. 137–146.
- Lopes, N.; Vila Real, P.M.M.; Simões da Silva, L.; Franssen, J.M. (2012). *“Numerical analysis of stainless steel beam-columns in case of fire”*. Fire Safety Journal. Vol 50, p.35-50.
- Lopes, N. (2009). *“Behaviour of stainless steel structures in case of fire”*. Universidade de Aveiro, Dissertação de Doutoramento.
- Palacios, L.(2005). *“Shear Design of Stainless Plate Girders”*. Universitat Politècnica de Catalunya. Dissertação de Doutoramento.
- Piloto, P.A. (2000). *“Análise experimental e numérica do comportamento de estruturas metálicas sujeitas à acção do fogo”*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Dissertação de Doutoramento.
- Quiel, S.E.; Garlock, M.E.M. (2010). *“Calculating the buckling strength of steel plates exposed to fire”*. Thin-Walled Structures. Vol 48, nº 9, p. 684-695.
- Rossi, B. (2010). *“Mechanical behavior of ferritic grade 3Cr12 stainless steel—Part 1: Experimental investigations”*. Thin-Walled Structures. Vol 48, nº 7, p. 553-560.
- Simões da Silva, L.; Gervásio, H. (2007). *“Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: métodos avançados: eurocódigo 3: projecto de estruturas de aço”*. CMM- Associação Portuguesa a de Construção Metálica e Mista.
- Simões, R.A.D. (2005). *“Manual de dimensionamento de estruturas metálicas: eurocódigo 3: projecto de estruturas de aço”*. CMM-Associação Portuguesa de Construção Metálica e Mista.

Vila Real, P.M.M. (2003). *“Incêndio em Estruturas Metálicas - Cálculo Estrutural”*. Amadora: Edições Orion

Vila Real, P.M.M.; Lopes, N.; Simões da Silva, L.; Franssen, J-M. (2008). *“Lateral–torsional buckling of stainless steel I-beams in case of fire”*. Journal of Constructional Steel Research. Vol 64, nº 11, p. 1302-1309.

Vila Real, P.M.M. (2010). *“Encurvadura de placas – Enfunamento”*. Apontamentos da unidade curricular Complementos de Construção Metálica e Mista - 5º Ano, Engenharia Civil, Universidade de Aveiro

Anexos

A. Restantes resultados obtidos

De seguida apresentam-se os restantes resultados numéricos obtidos. Primeiramente os gráficos são apresentados segundo o tipo de carregamento, sendo para $\Psi=1$ enunciado primeiro, seguido do $\Psi=0$ e para finalizar são apresentados os gráficos para $\Psi=-1$.

A ordem estabelecida para a apresentação dos resultados segundo os tipos de aço é a seguinte: aços inoxidáveis da classe 1.4301, 1.4003 e por último 1.4462.

Em suma, os gráficos representativos para $\Psi=1$ são os apresentados desde a Figura A.1 até à Figura A.17; para $\Psi=0$ são a Figura A.18 e Figura A.19 e para $\Psi=-1$ são a Figura A.20 e Figura A.21. Os gráficos correspondentes ao aço inoxidável da classe 1.4301 é a Figura A.1; ao aço inoxidável 1.4003 são desde a Figura A.2 até à Figura A.8, a Figura A.18 e a Figura A.20; ao aço inoxidável 1.4462 são desde a Figura A.9 até à Figura A.17, a Figura A.19 e a Figura A.21.

Os gráficos referentes ao fator de carregamento $\Psi=1$ são apresentados a seguir.

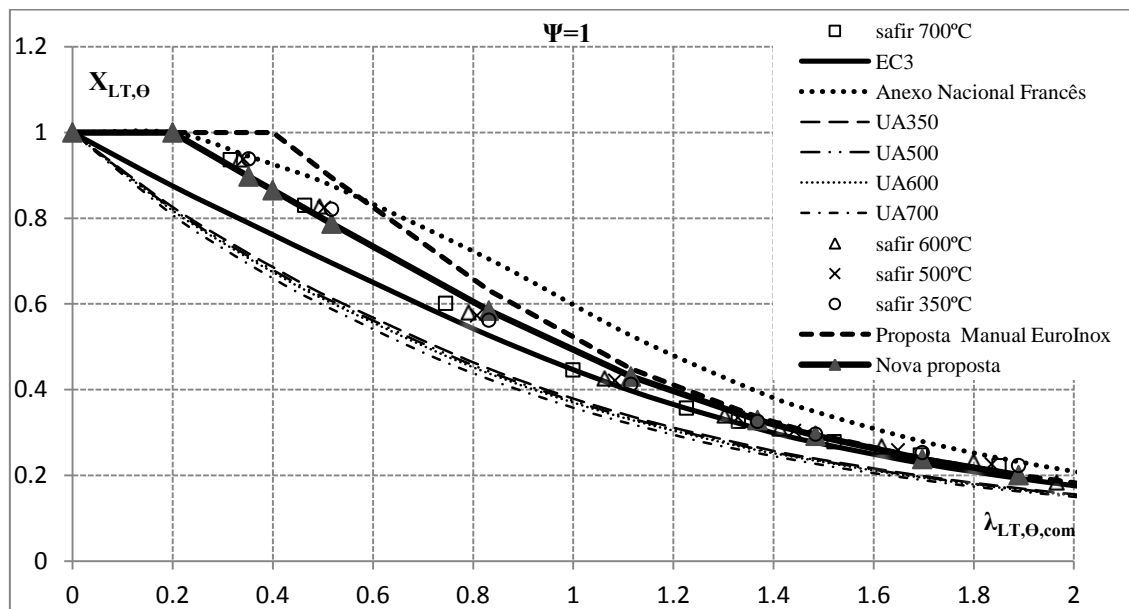


Figura A.1 - Resultados numéricos para vigas 416x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4301 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

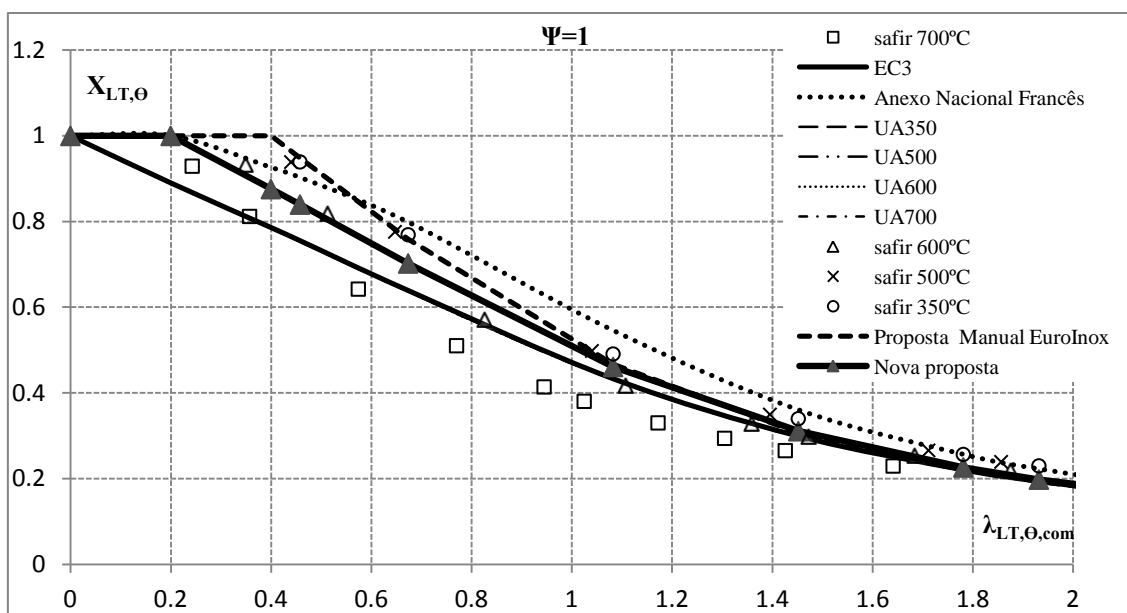


Figura A.2 - Resultados numéricos para vigas 416x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

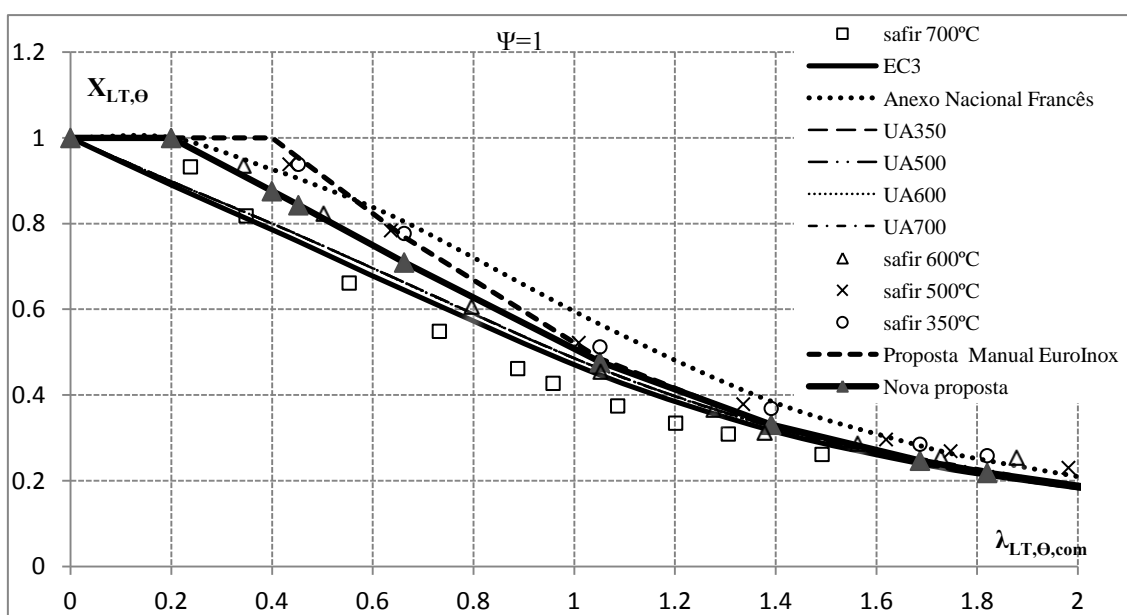


Figura A.3 - Resultados numéricos para vigas 336x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

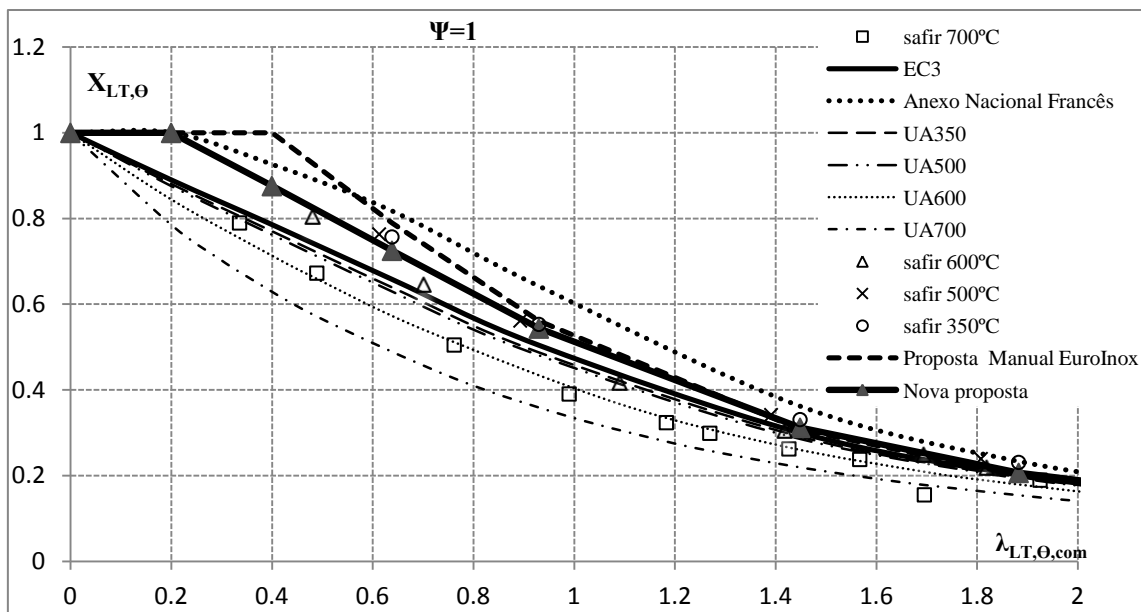


Figura A.4 - Resultados numéricos para vigas 366x5 150x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

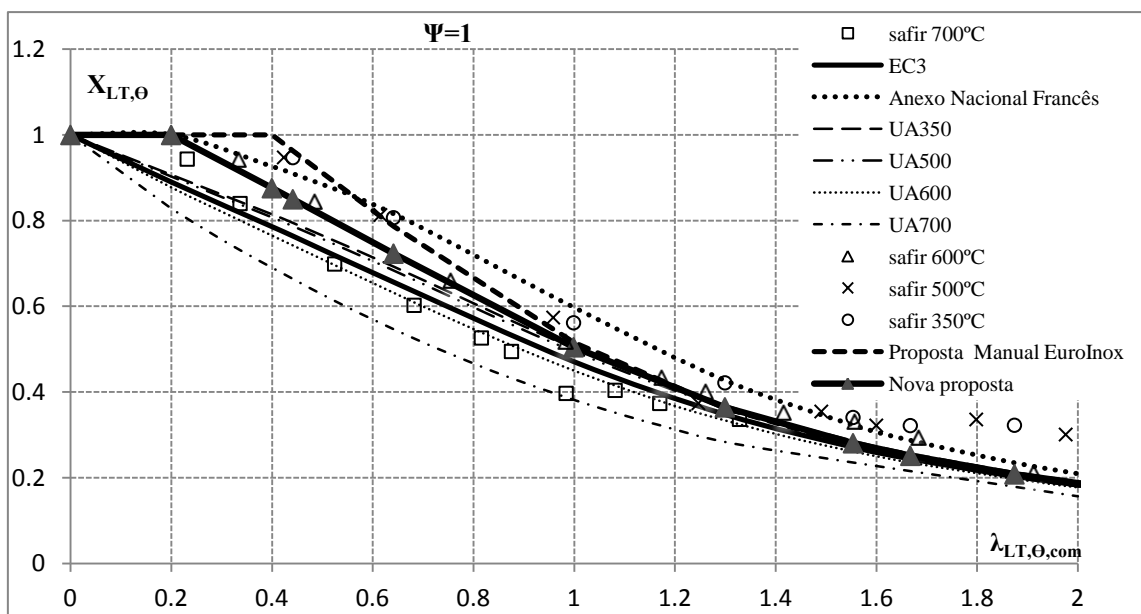


Figura A.5 - Resultados numéricos para vigas 266x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 3 e banzo de Classe 4)

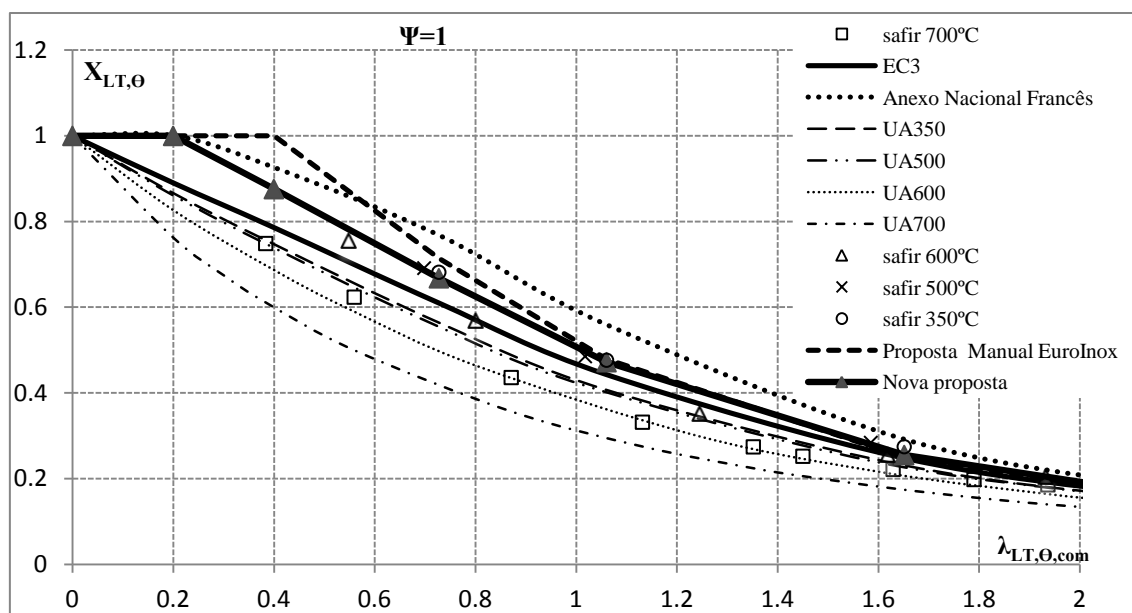


Figura A.6 - Resultados numéricos para vigas 416x5 135x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 3)

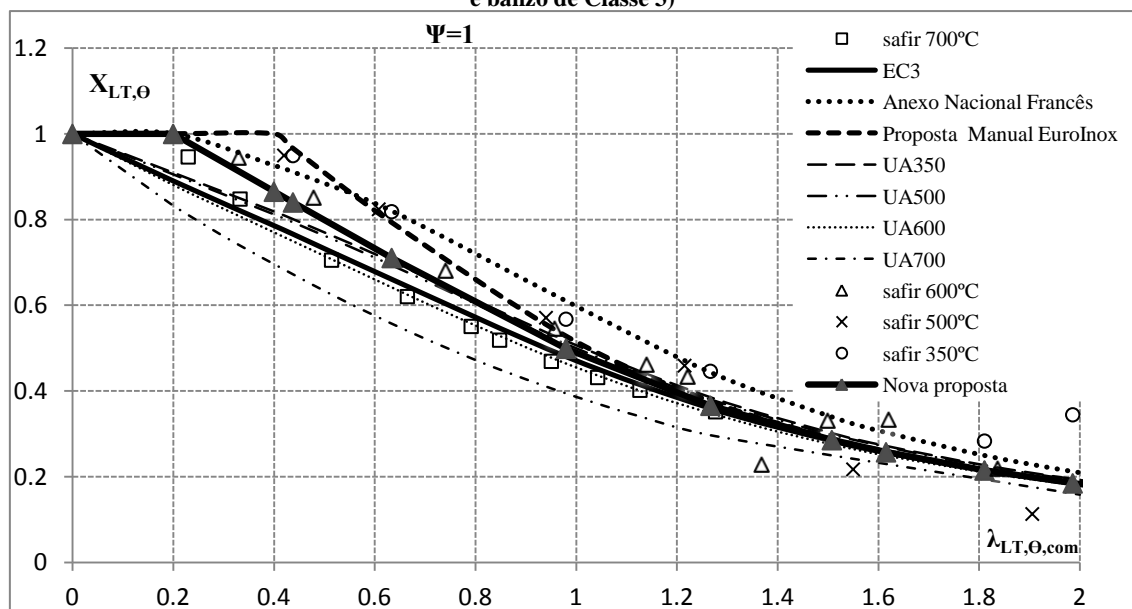


Figura A.7 - Resultados numéricos para vigas 246x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 2 e banzo de Classe 4)

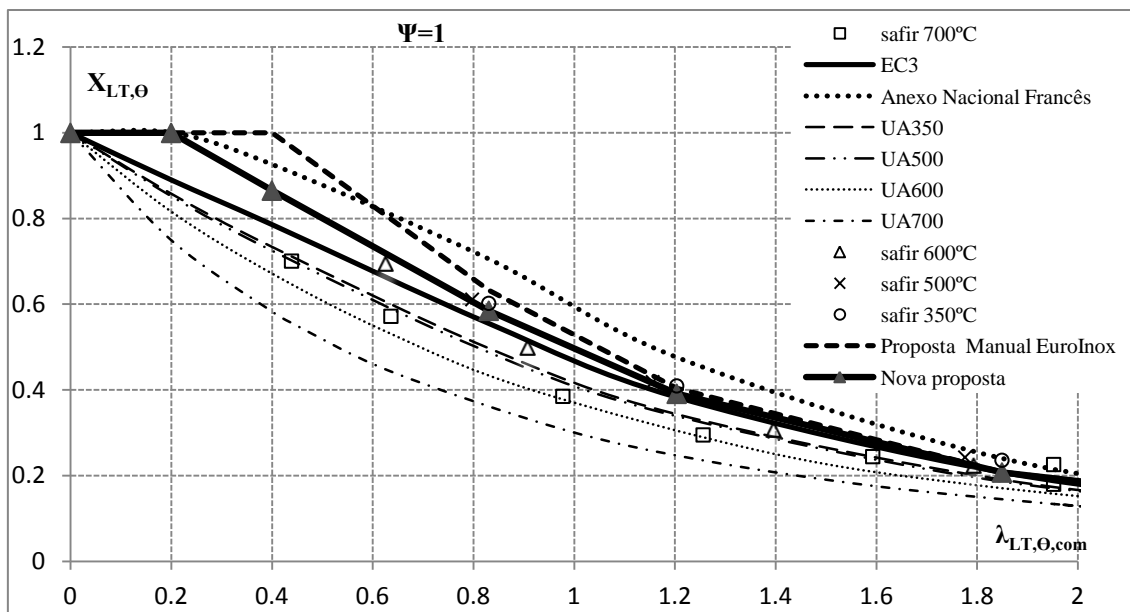


Figura A.8 - Resultados numéricos para vigas 416x5 120x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 2)

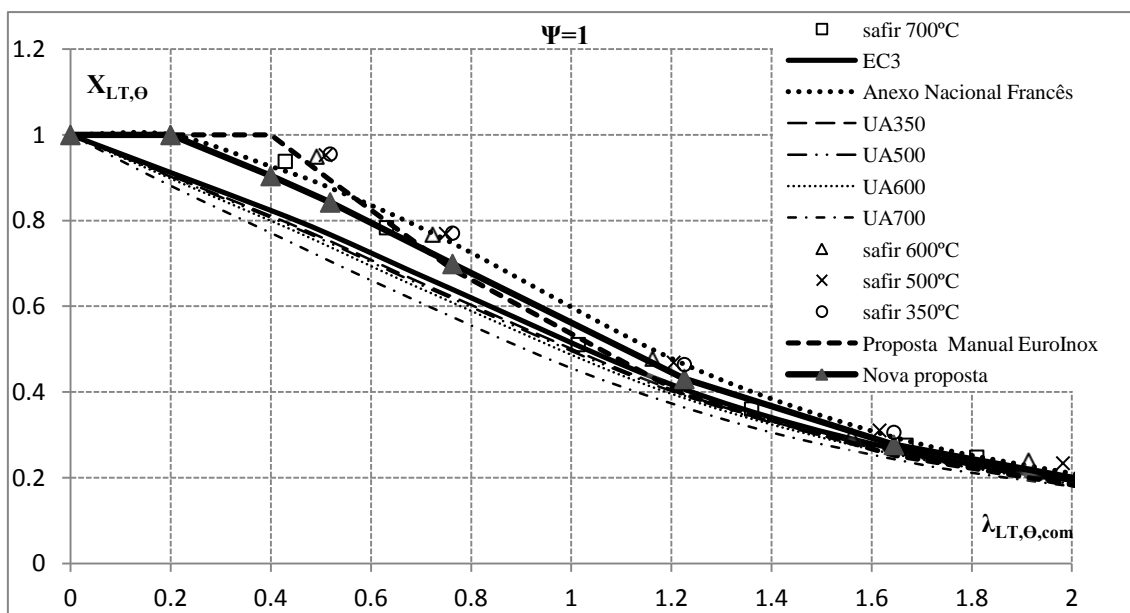


Figura A.9 - Resultados numéricos para vigas 416x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

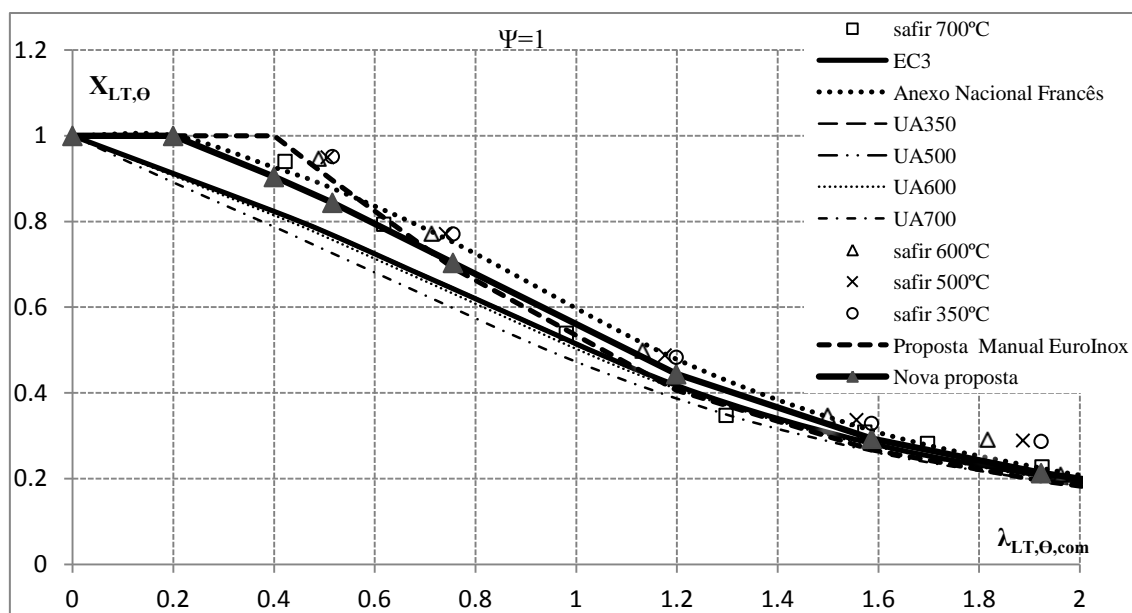


Figura A.10 - Resultados numéricos para vigas 336x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

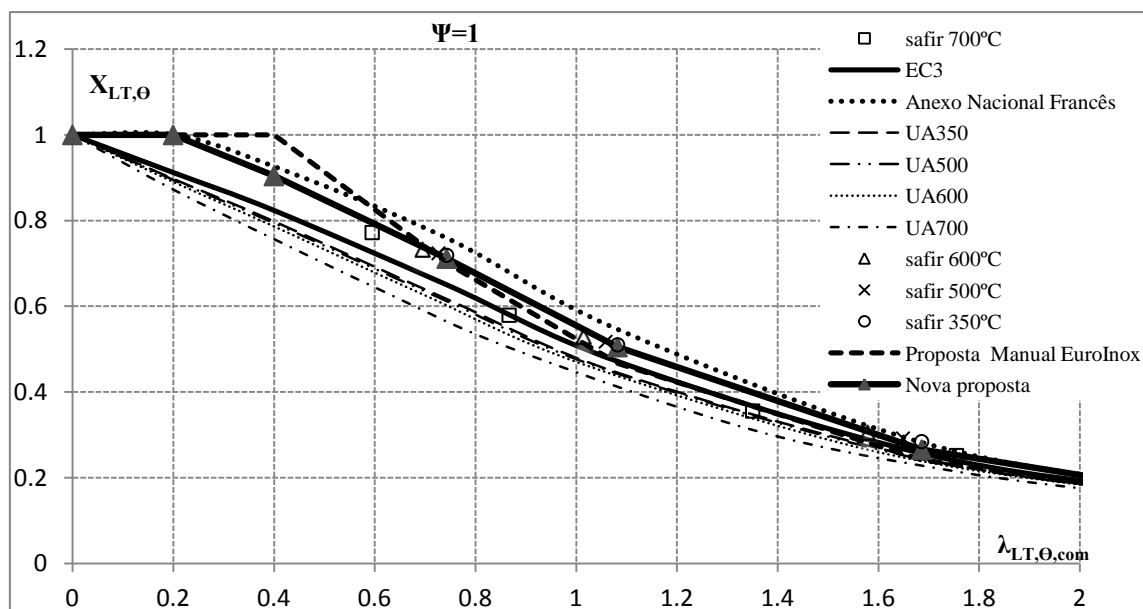


Figura A.11 - Resultados numéricos para vigas 366x5 150x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

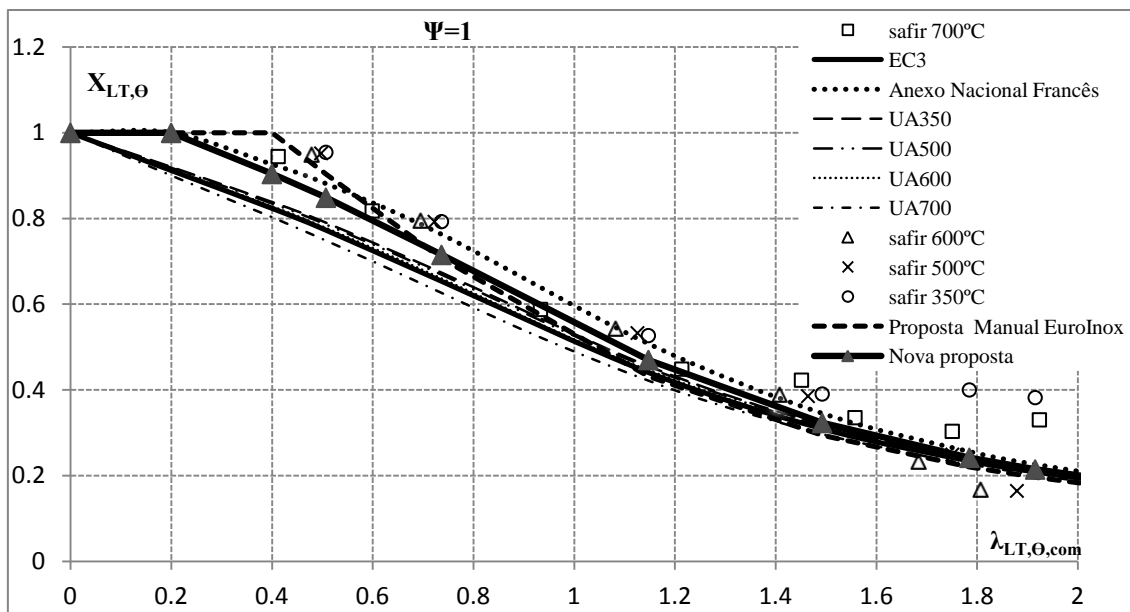


Figura A.12 - Resultados numéricos para vigas 266x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

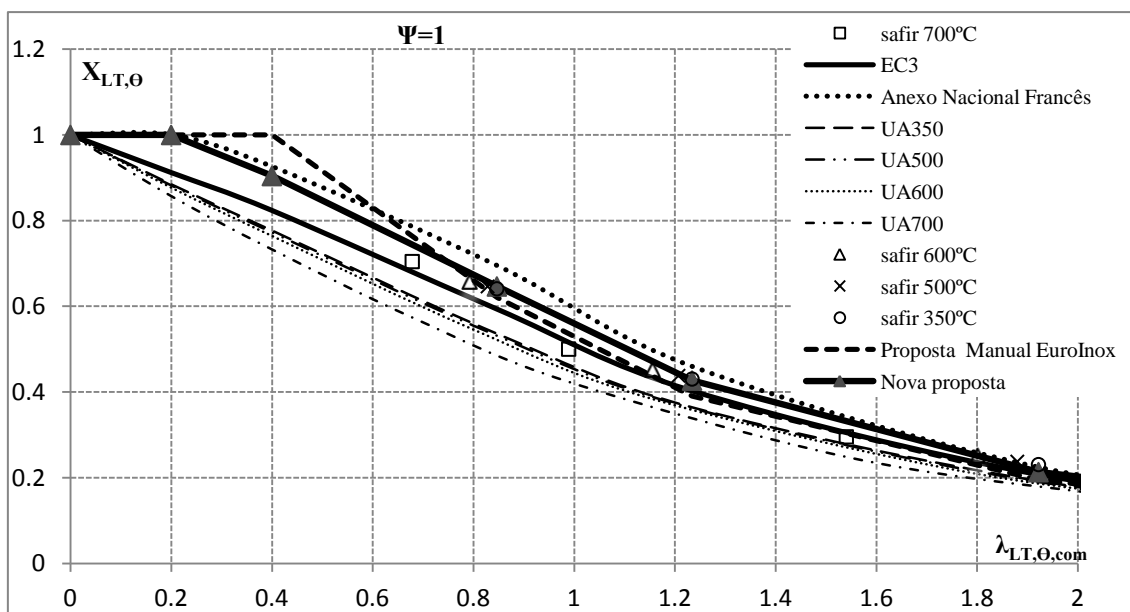


Figura A.13 - Resultados numéricos para vigas 416x5 135x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

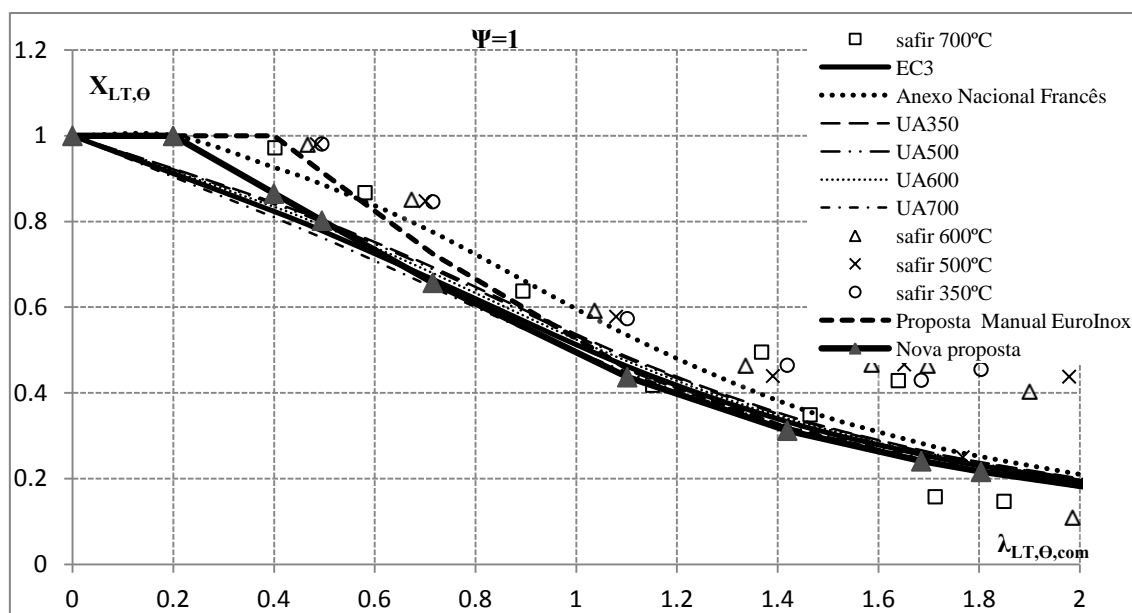


Figura A.14 - Resultados numéricos para vigas 236x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 3 e banzo de Classe 4)

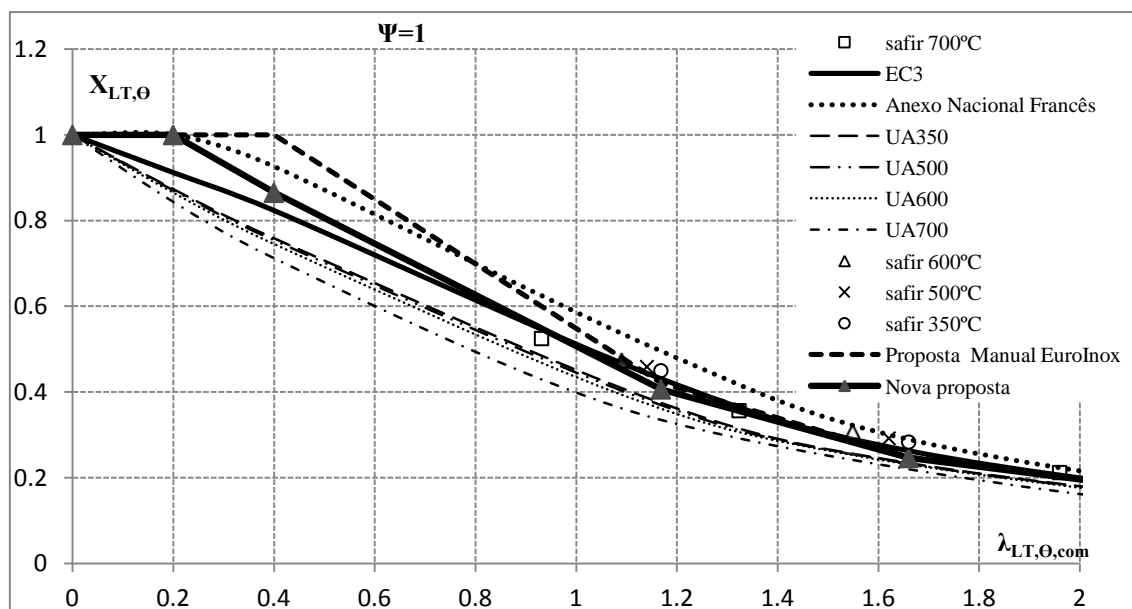


Figura A.15 - Resultados numéricos para vigas 366x5 100x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 3)

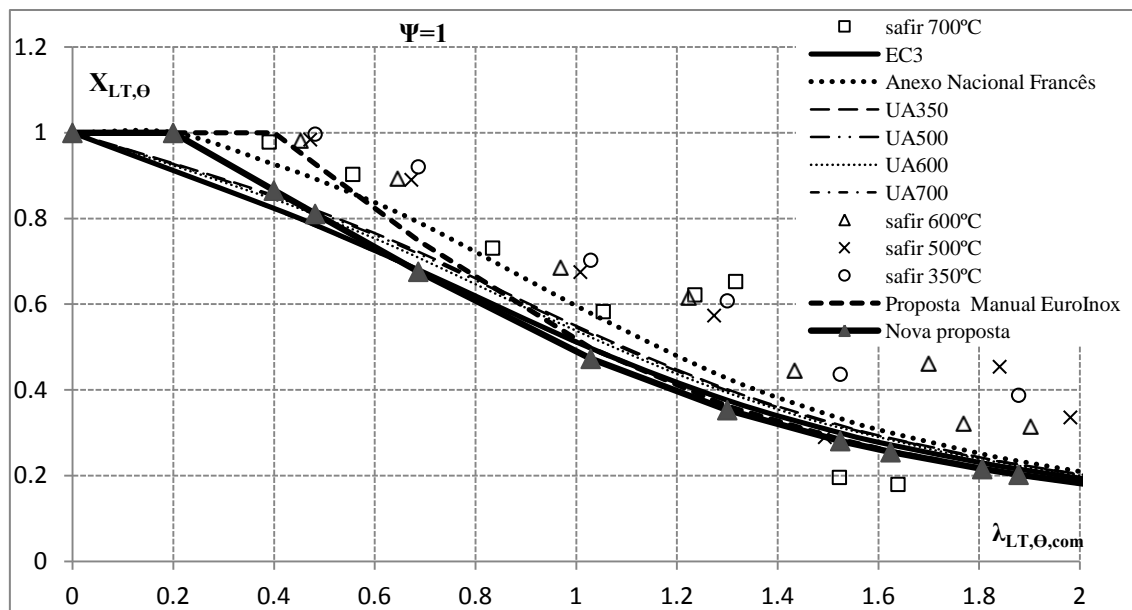


Figura A.16 - Resultados numéricos para vigas 186x5 200x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 2 e banzo de Classe 4)

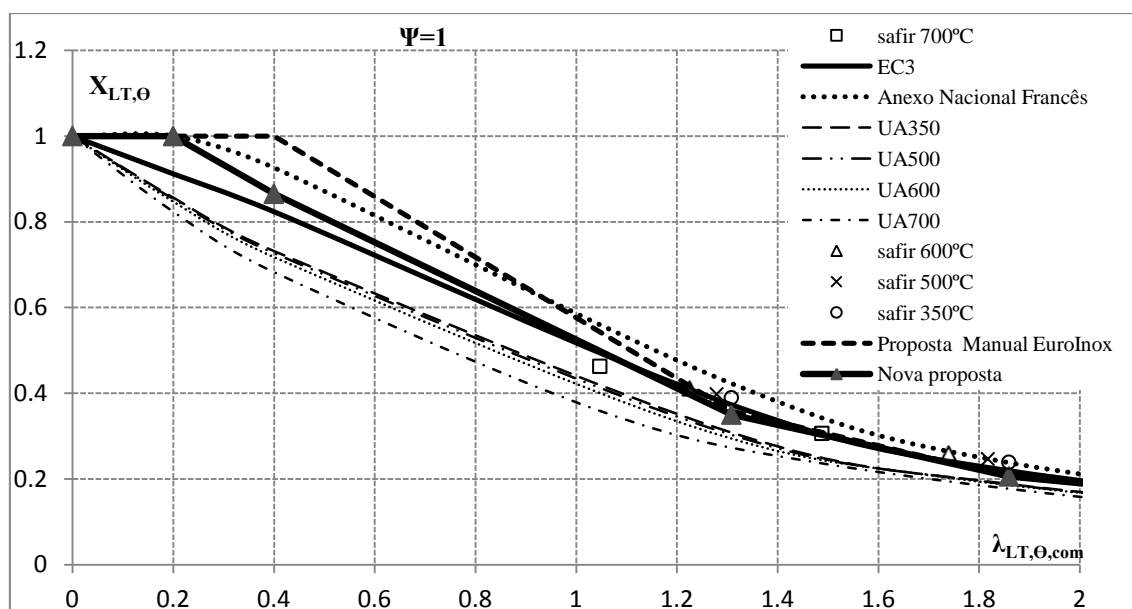


Figura A.17 - Resultados numéricos para vigas 416x5 91x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 2)

Seguem-se os gráficos referentes ao fator de carregamento $\Psi=0$.

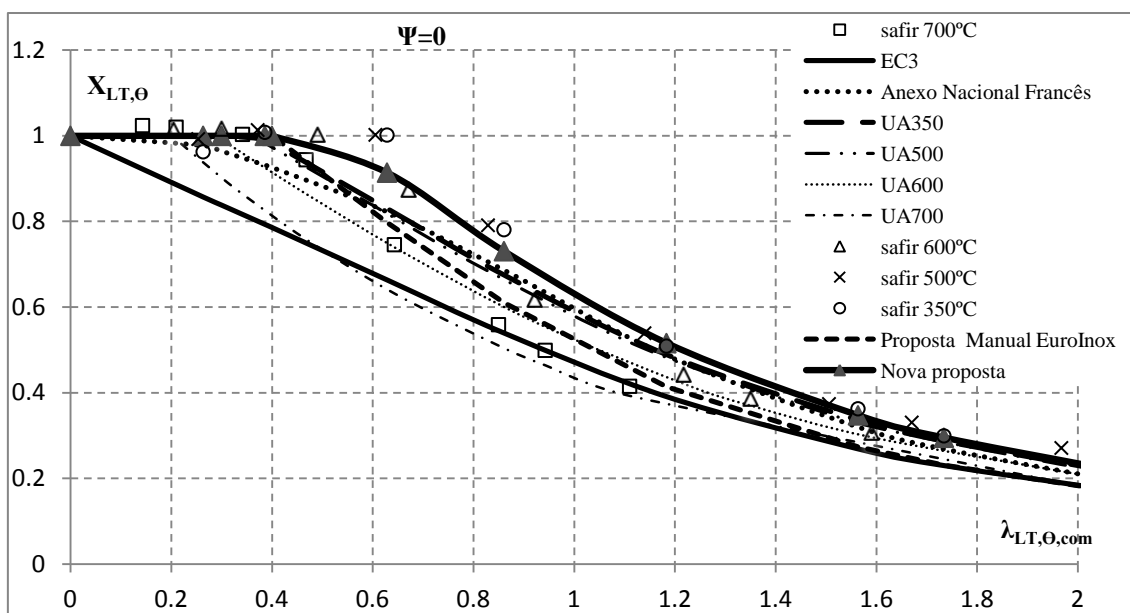


Figura A.18 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

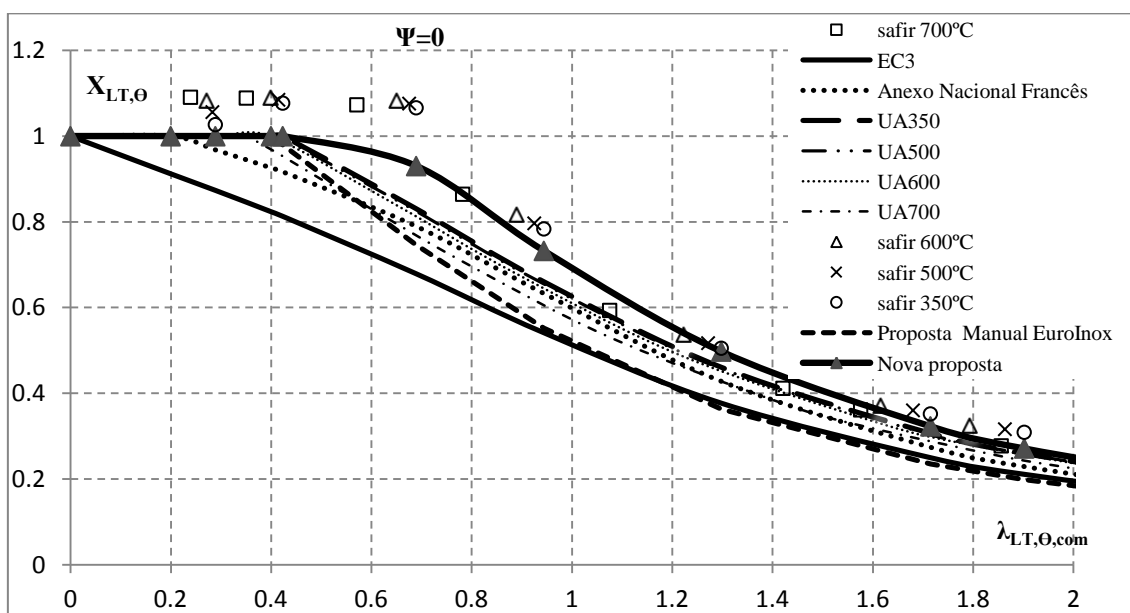


Figura A.19 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

Por último, os gráficos referentes ao fator de carregamento $\Psi=-1$ são apresentados seguidamente.

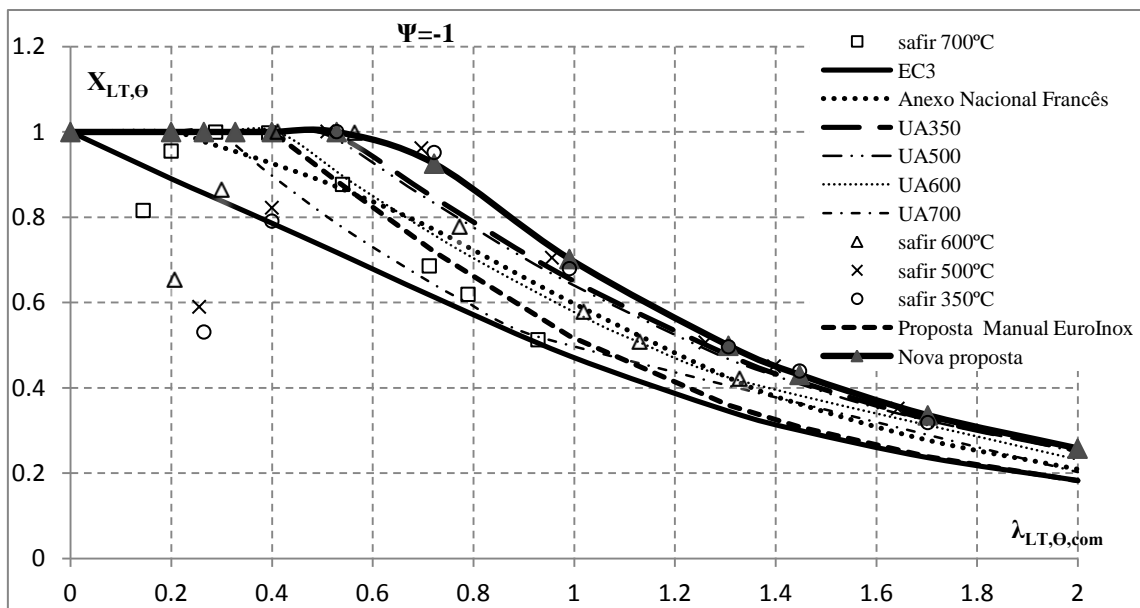


Figura A.20 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4003 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)

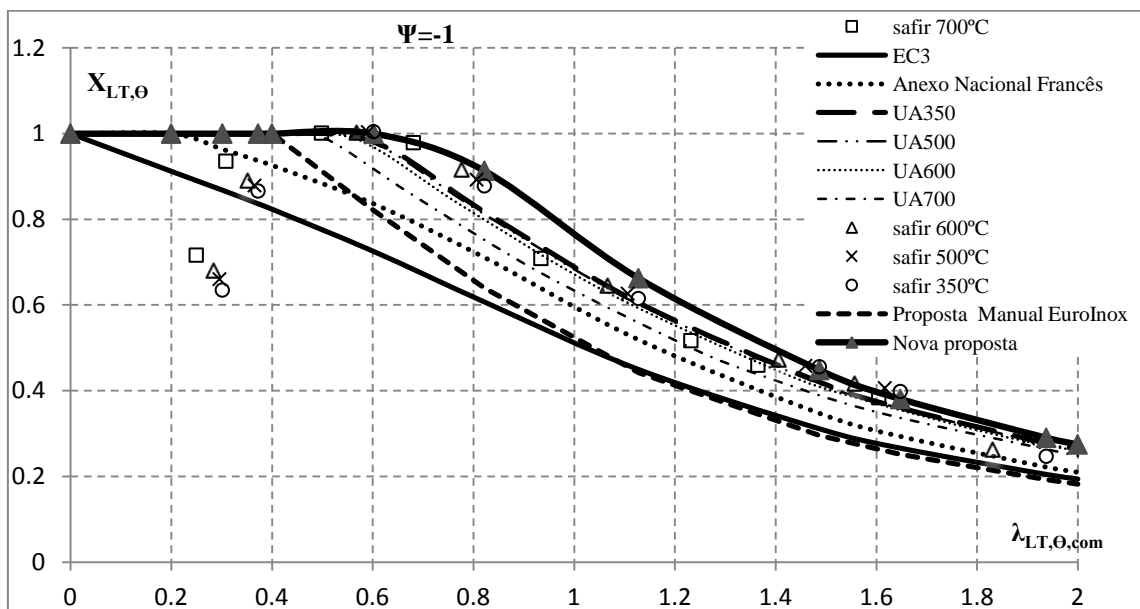


Figura A.21 - Resultados numéricos para vigas 516x5 255x8 de aço inoxidável da classe 1.4462 (alma de Classe 4 e banzo de Classe 4)